



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

“Desarrollar un modelo de administración de tránsito basado en agentes que interactúen en una intercepción de calles, dentro de una ciudad virtual.”

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar por el título de

INGENIERÍA INDUSTRIAL

REALIZADO POR: CALDERÓN BRICEÑO, ALEXANDER

PROFESOR GUÍA: DR. HENRY GASPARÍN

FECHA: 12 DE JUNIO DE 2014

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

“Desarrollar un modelo de administración de tránsito basado en agentes que interactúen en una intercepción de calles, dentro de una ciudad virtual.”

Este jurado, una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado:.....

JURADO EXAMINADOR

Firma: _____ Firma: _____ Firma: _____

Nombre: _____ Nombre: _____ Nombre: _____

REALIZADO POR: CALDERÓN BRICEÑO, ALEXANDER

PROFESOR GUÍA: DR. HENRY GASPARÍN

FECHA: 12 DE JUNIO DE 2014

AGRADECIMIENTOS

Gracias a dios por el tema del presente trabajo, la oportunidad que se me dio de realizarlo, toda la experiencia vivida, a las horas de esfuerzo utilizadas y a todas las personas que me ayudaron en el proceso, sin alguna de ellas no hubiese podido lograrlo.

Gracias a los profesores Alirio Villanueva y Henry Gasparín, a todo el personal del CIDI y a Juan Carlos Núñez, por toda la atención, paciencia y apoyo que me brindaron. También a mi familia y a Patricia.

Gracias Dani, sin ti no hubiese podido hacerlo. Gracias por acompañarme y guiarme en todo momento, siempre estás ahí para ayudarme y sin tu apoyo no hubiese podido lograrlo.

“Desarrollar un modelo de administración de tránsito basado en agentes que interactúen en una intercepción de calles, dentro de una ciudad virtual.”

Autor: Calderón Briceño, Alexander

Tutor: Dr. Henry Gasparín

Año: 2014

SINOPSIS

Anualmente aumenta significativamente la cantidad de vehículos que circulan por las calles de las ciudades sin aumentar en igual proporción la capacidad que las mismas tienen para soportar semejante tráfico. Además, no basta con solo construir nuevos caminos, o modificar los existentes, debido a que dichas acciones pueden ocasionar graves efectos secundarios no considerados.

Como parte de la solución, se han utilizado novedosas herramientas de simulación entre las que destaca la simulación basada en agente, concentrada en la forma de razonar de cada uno. Utilizando estas técnicas, el presente Trabajo Especial de Grado estudia una intercepción de calles de una ciudad virtual en la cual son medidos los tiempos y la cantidad de vueltas que realizan los vehículos al circular por la misma.

Utilizando una metodología de modelado evolutivo, fue generado un modelo representativo de una rotonda cuadrada compuesta por tres entradas y salidas en la cual los vehículos son creados en sus extremos y son capaces de circular alrededor de la misma.

Se evaluaron tres escenarios distintos obteniendo un comportamiento emergente cuando los agentes interactúan entre ellos. Además, al aumentar el número de agentes que circulan, aumenta el tiempo que tardan en completar el recorrido y la cantidad de vueltas que pueden realizarse.

PALABRAS CLAVE: Simulación basada en el agente, rotondas, red vial, motor de razonamiento, modelado evolutivo

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	i
SINOPSIS.....	ii
INDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	ix
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	3
1. 1. Planteamiento del problema.....	3
1. 2. Antecedentes	5
1. 3. Justificación	7
1. 4. Objetivo General	7
1. 5. Objetivos Específicos	7
1. 6. Alcance	7
1. 7. Limitaciones.....	8
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	9
2. 1. El tráfico vehicular	9
2. 2. La vía pública.....	12
2. 3. La simulación.....	13
2. 3. 1. Tipos de simulación.....	14
2. 3. 2. Elementos de un sistema	15
2. 3. 3. Simulación con SeSAm	16
2. 3. 4. Simulación basada en el agente.....	17

2. 3. 5. Elementos de SeSAm	18
2. 4. Pruebas de hipótesis	20
2. 4. 1. La hipótesis nula.....	20
2. 4. 2. Nivel de significación	21
2. 5. Pruebas de la bondad de ajuste	21
2. 5. 1. Contraste chi-cuadrada de bondad de ajuste	22
2. 5. 3. Distribución exponencial negativa	24
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO	25
3. 1. Tipo de investigación	25
3. 2. Fases de la metodología.....	25
3. 1. 1. Comunicación.....	25
3. 1. 2. Planeación	26
3. 1. 3. Modelado	26
3. 1. 4. Construcción	26
CAPÍTULO 4: ELABORACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	28
4. 1. Características del mapa	28
4. 2. Diseño y ubicación de la rotonda	28
4. 2. 1. El islote central.....	29
4. 2. 2. Baldosas de circulación	29
4. 2. 3. Características de diseño.....	31
4. 2. 4. Dimensiones y ubicación espacial.....	37
4. 3. Diseño de los vehículos	37
4. 3. 1. Características físicas.....	38
4. 3. 2. Características de las variables.....	38

4. 4. Razonamiento de los vehículos	43
4. 4. 1. Inicio del motor de razonamiento	44
4. 4. 2. Movimientos fuera de la redoma	44
4. 4. 3. Movimientos dentro de la redoma	49
4. 5. Características del mundo	54
4. 5. 1. Creación de los vehículos.	56
4. 5. 2. Variables globales	57
4. 6. Variable respuesta del modelo	58
4. 7. Validación del modelo	59
CAPÍTULO 5. DISEÑO Y RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS DEL MODELO	61
5. 1. Descripción general	61
5. 1. 1. Escenario uno	61
5. 1. 2. Escenario dos.....	64
5. 1. 3. Escenario tres	67
5. 1. 4. Comparación de escenarios.....	70
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
6. 1. Análisis de resultados	72
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
7. 1. Conclusiones	75
7. 2. Recomendaciones.....	76
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS.....	A-1

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.- COORDENADAS ESPACIALES DE LAS ENTRADAS	55
TABLA 2.- RUTAS MÁS CORTAS	62
TABLA 3.- TIEMPO DE RECORRIDO DE RUTA MÁS CORTA.....	63
TABLA 4.- RUTAS MÁS LARGAS	63
TABLA 5.- TIEMPO DE RECORRIDO DE RUTA MÁS LARGA	64
TABLA 6.- TIEMPO DE RECORRIDO ESCENARIO 2	65
TABLA 7.- CANTIDAD DE VUELTAS ESCENARIO 2	65
TABLA 8.- TIEMPO DE RECORRIDO ESCENARIO 3	68
TABLA 9.- CANTIDAD DE VUELTAS ESCENARIO 3	68
TABLA 10.- RESUMEN DE TIEMPOS DE RECORRIDOS	71
TABLA 11.- RESUMEN DE VUELTAS REALIZADAS.....	71
TABLA 12.- DATOS DE VEHÍCULOS	A-14

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.- IMAGEN DEL MAPA DE SESAM.....	19
FIGURA 2.- ISLOTE CENTRAL.	29
FIGURA 3.- BALDOSAS DE CIRCULACIÓN INFERIOR Y SUPERIOR.....	30
FIGURA 4.- BALDOSAS DE CIRCULACIÓN MARCADAS COMO “IMPEDIR CAMBIO DE CANAL”	31
FIGURA 5.- ROTONDA TIPO 1.	32
FIGURA 6.- VISTA CERCANA DE LA ROTONDA CUADRADA.....	33
FIGURA 7.- SECTOR 0 DE LA ROTONDA.....	34
FIGURA 8.- SECTOR 1 DE LA ROTONDA.....	34
FIGURA 9.- SECTOR 2 DE LA ROTONDA.....	35
FIGURA 10.- SECTOR 3 DE LA ROTONDA.....	35
FIGURA 11.- SECTOR 4 DE LA ROTONDA.....	36
FIGURA 12.- SECTOR 5 DE LA ROTONDA.	36
FIGURA 13.- MOTOR DE RAZONAMIENTO BÁSICO.	44
FIGURA 14.- CAMBIO DE CANAL FUERA DE REDOMA.....	47
FIGURA 15.- ENTRADA A LA REDOMA	48
FIGURA 16.- CAMBIOS DE CANAL DENTRO DE REDOMA.....	52
FIGURA 17.- ENTRADA DE LOS VEHÍCULOS.....	55
FIGURA 18.- MOTOR DE RAZONAMIENTO DE “MUNDO DE CARROS”	56
FIGURA 19.- RUTA MÁS CORTA.....	62
FIGURA 20.- RUTA MÁS LARGA.	64
FIGURA 21.- DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE RECORRIDO ESCENARIO 2.	66
FIGURA 22.- DISTRIBUCIÓN DEL NÚMERO DE VUELTAS ESCENARIO 2.	67
FIGURA 23.- DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE RECORRIDO ESCENARIO 3.	69
FIGURA 24.- DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE RECORRIDO ESCENARIO 3.	70
FIGURA 25.- ESQUEMA INICIAL DEL MOTOR DE RAZONAMIENTO.	A-9
FIGURA 26.- ACTIVIDADES FUERA DE LA ROTONDA.....	A-9
FIGURA 27.- ACTIVIDADES DE ENTRADA A LA ROTONDA.	A-10

FIGURA 28.- UBICARSE EN EL CARRIL INTERNO FUERA DE LA ROTONDA.....	A-10
FIGURA 29.- UBICARSE EN EL CARRIL EXTERNO FUERA DE LA ROTONDA.	A-11
FIGURA 30.- ACTIVIDADES DENTRO DE LA ROTONDA.	A-11
FIGURA 31.- ACTIVIDADES DE GIROS EN ESQUINA.	A-12
FIGURA 32.- UBICARSE EN EL CARRIL INTERNO DENTRO DE LA ROTONDA.	A-12
FIGURA 33.- UBICARSE EN EL CARRIL EXTERNO DENTRO DE LA ROTONDA.....	A-13
FIGURA 34.- ACTIVIDADES DE SALIDA DE LA ROTONDA.....	A-13

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.- Etapas del modelo de prototipo evolutivo	A-1
Anexo 2.- Esquema del motor de razonamiento.....	A-9
Anexo 3.- Actividades del motor de razonamiento fuera de la rotonda	A-9
Anexo 4.- Actividades de entrada a la rotonda.....	A-10
Anexo 5.- Ubicarse en el carril interno fuera de la rotonda	A-10
Anexo 6.- Ubicarse en el carril externo fuera de la rotonda	A-11
Anexo 7.- Actividades del motor de razonamiento fuera de la rotonda	A-11
Anexo 8.- Actividades de giros en esquina	A-12
Anexo 9.- Ubicarse en el carril interno dentro de la rotonda	A-12
Anexo 10.- Ubicarse en el carril externo dentro de la rotonda.....	A-13
Anexo 11.- Actividades de salida de la rotonda	A-13
Anexo 12.- Datos de vehículos.....	A-14

INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento poblacional en las ciudades y la necesidad de las personas de desplazarse con el objeto de realizar sus actividades diarias resulta en un gran problema en lograr gestionar las vías públicas para alcanzar un desplazamiento rápido y seguro a lo largo de la red vial.

Para solucionar los problemas de tránsito en una ciudad, la construcción de nuevos caminos no siempre resulta ser la mejor opción debido al alto costo, el tiempo y el espacio que implica. Incluso puede empeorar algunas situaciones u ocasionar nuevos inconvenientes debido a las interacciones con otros sectores de la red vial.

Por lo tanto, las autoridades responsables deben contar con distintas herramientas con el objeto de determinar cuál es la mejor opción a tomar entre las cuales se encuentra la simulación por computadora.

Una de las distintas opciones a implementar son las rotondas, las cuales son un tipo particular de intercepción que permiten el flujo de altos niveles de vehículos alrededor de un elemento central.

Este Trabajo Especial de Grado forma parte de una línea de investigación que busca determinar las restricciones de tráfico aplicables para mejorar el flujo vehicular dentro de una ciudad virtual y tiene por objeto generar un modelo de simulación de tránsito homogéneo de vehículos en un conjunto de calles que convergen en una rotonda, considerando el enfoque de simulación basada en agentes.

La estructura de la investigación se detalla a continuación.

Capítulo 1. Problema de investigación: incluye el planteamiento del problema, los antecedentes de la investigación, sus objetivos, alcance, limitaciones y justificación.

Capítulo 2. Marco teórico: presenta los términos necesarios conocer para una adecuada comprensión del presente Trabajo Especial de Grado.

Capítulo 3. Marco metodológico: explica el tipo de investigación utilizada para el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado.

Capítulo 4. Elaboración del modelo de simulación: se presentan todos los elementos que deberán interactuar durante la simulación así como las relaciones existentes entre ellos.

Capítulo 5. Diseño y resultados de los escenarios del modelo: detalla los distintos escenarios en los cuales se desenvuelven las distintas entidades, así como también los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

Capítulo 6. Análisis de resultados: incluye un análisis de los resultados obtenidos en los distintos escenarios y un análisis comparativo entre los mismos.

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones del trabajo: tomando como base la variable respuesta del modelo, son presentados los resultados de la investigación dando cumplimiento a los objetivos establecidos.

CAPÍTULO 1: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Este capítulo presenta el planteamiento del problema de investigación del presente Trabajo Especial de Grado, los antecedentes, justificación, objetivos, alcance y limitaciones.

1. 1. Planteamiento del problema

Una de las consecuencias del aumento poblacional mundial es la tendencia de la sociedad a concentrarse en las ciudades, provocando un gran crecimiento de estas al convertirse en enormes centros de las actividades económicas y sociales, extendiéndose por miles de kilómetros cuadrados y abarcando diversas poblaciones satélites.

Sin embargo, este crecimiento no suele ser planificado lo que conlleva a tener ciudades con gran volumen de habitantes cuyas calles y avenidas no son lo suficientemente aptas para permitir un fácil desplazamiento vehicular, lo cual tiene implicaciones adversas tales como ambientales, económicas y de seguridad social.

El incremento poblacional ha originado un abrupto aumento de vehículos en circulación en ciudades que no cuentan con la capacidad para crecer al mismo ritmo. Por lo que es necesario estudiar e implementar un conjunto de herramientas que puedan gestionar la demanda de tráfico de vehículos para así permitir una fácil movilización de las personas.

Entre las herramientas de gestión del tránsito vehicular se tiene el establecimiento de rotondas (o redomas), las cuales son dispositivos de autorregulación. Esta consiste en una plaza central a la cual convergen diversas vías de circulación y entorno a la cual los automóviles fluyen. Su diseño ocasiona que el conductor deba controlar la velocidad para no correr el riesgo de perder el control del vehículo o, incluso, volcarse.

Para el estudio del tráfico se cuenta con las distintas herramientas que provee la simulación por computadora, cuya popularidad ha aumentado como una importante herramienta de investigación de operaciones; por medio de la cual se puede estudiar un sistema real utilizando un modelo lógico-matemático, diseñado para imitar las características de comportamiento.

La simulación basada en agentes consta de un conjunto de métodos de modelado y simulado en los cuales existen organismos que disponen de un comportamiento asociado.

Estos modelos no cuentan con una autoridad que gestione el comportamiento de las entidades de manera global. Debido a esto, cada agente es un ente activo y autónomo dotado de comportamientos y atributos que les permite, entre otras cosas, interactuar con su entorno y tomar decisiones ante los distintos eventos que puedan presentarse.

Existen diferentes programas computacionales que permiten dicha investigación. Entre estos se encuentra SeSAm (Shell for Simulated Agent Systems), el cual utiliza un enfoque de programación basado en los agentes y es de tipo software libre, o *Open Source*. Fue desarrollado en la Universidad de Würzburg (Alemania), por el Departamento de Inteligencia Artificial y Ciencia Computacional Aplicada, para simulaciones basadas en agentes y ha sido utilizado para el desarrollo de modelos de sociedades de insectos, centro de llamadas y simulaciones de tráfico, entre otros.

Dada la importancia del efecto del tránsito en las ciudades modernas, el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad Católica Andrés Bello cuenta con una línea de investigación para el desarrollo de modelos computacionales que permitan simular el tránsito de vehículos en ciudades virtuales.

En virtud de lo expresado anteriormente surge la siguiente interrogante:

¿Se puede generar un modelo de simulación que permita estudiar el tránsito vehicular en una intersección de calles considerando el enfoque de simulación basada en agentes?

1. 2. Antecedentes

En la línea de investigación para el desarrollo de modelos computacionales que permitan simular el tránsito de vehículos en ciudades virtuales del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad Católica Andrés Bello, se han desarrollado cuatro (04) Trabajos Especiales de Grado relacionados con la presente investigación los cuales han sido elaborados como parte de los requisitos para optar por el Título de Ingeniero Industrial de la Universidad Católica Andrés Bello, sede Montalbán, Caracas, Venezuela.

El primero fue elaborado por (Armas Zapata, 2011) y titulado “Determinación de los cambios que se producen en una ruta de distribución cuando se sustituyen los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) por rotondas (sistemas de autorregulación) en una ciudad virtual, haciendo uso de un modelo de simulación”.

Este trabajo observó que la sustitución de los semáforos por rotondas en las intersecciones genera un marcado aumento en el flujo de vehículos por unidad de tiempo, aún manteniéndose la misma velocidad de desplazamiento de los mismos.

La segunda investigación fue elaborada por (Valsecchi Pellico & Marín Armas, 2011) y titulada “Determinación de las mejores rutas de distribución dentro de una ciudad virtual donde todos los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) han sido sustituidos por rotondas (sistemas de autorregulación, haciendo uso de un modelo de simulación”.

En la misma se observó que se consigue una mayor fluidez al ubicar las rotondas en las intersecciones entre las calles principales, evitando así ubicarlas entre intersecciones seguidas. Además, se observó que este elemento permite a los conductores cambiar de ruta rápidamente, lo que reduce su distancia recorrida. Sin

embargo, dicha distancia aumenta cuando el vehículo necesita desplazarse a través de un grupo de rotondas consecutivas.

El tercer trabajo fue elaborado por (Robles Hurtado, 2012) y titulado “Determinación de las restricciones de tráfico a ser aplicadas en la mejora del flujo vehicular en una ciudad virtual donde todos los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) han sido sustituidos por rotondas (dispositivo de autorregulación), haciendo uso de un modelo de simulación”.

En esta investigación fue construida una red vial constituida por dieciséis (16) rotondas, ocho (8) con tres (3) entradas e igual número de salidas y ocho (8) con cuatro (4) entradas e igual número de salida, catorce (14) calles y avenidas, siete (7) horizontales e igual número verticales.

Esto permitió probar tres escenarios de medidas de restricción vehicular: Pico & Placa, Carpool y una combinación de ambas. A partir de esto, se obtuvo una marcada disminución del tiempo de recorrido de los vehículos al moverse por la red vial al combinar las restricciones vehiculares.

La última investigación fue elaborada por (Arvelaiz, 2012) y titulada “Desarrollo e implementación de un conjunto de herramientas computacionales para el modelado de tráfico heterogéneo en intersecciones con semáforos: caso venezolano”.

En esta investigación se trabaja con el enfoque de simulación basada en agentes, lo que sirve de apoyo para el presente trabajo. En la misma se obtuvo que la velocidad promedio de los vehículos es inversamente relacionada con la densidad vehicular de carros en la pista; además, la proporción relativa de aceleraciones/desaceleraciones aumenta conforme aumenta la densidad vehicular.

1. 3. Justificación

El aumento poblacional impulsa a preocuparnos por el desarrollo de herramientas que permitan la fácil y rápida movilización de personas dentro de las distintas ciudades; además, que contribuyen indirectamente en la solución a distintos problemas tales como ambientales, económicos y de seguridad social. Por tal motivo, es pertinente para la ingeniería la investigación de alternativas de solución a los distintos problemas relacionados con el tráfico vehicular.

1. 4. Objetivo General

Desarrollar un modelo de administración de tránsito basado en agentes que interactúen en una intersección de calles, dentro de una ciudad virtual.

1. 5. Objetivos Específicos

1. Generar un modelo de simulación representativo de un sistema de administración de tráfico basados en agentes.
2. Validar el modelo de simulación.
3. Desarrollar escenarios de operación del sistema.
4. Comparar los escenarios de operación del sistema.
5. Comprobar la operatividad del mejor escenario.

1. 6. Alcance

El tránsito vehicular estará conformado por carros que circulan alrededor de una rotonda de forma cuadrada, la cual está constituida por tres vías de entrada y tres vías de salida.

El modelo de simulación será desarrollado en el programa SeSAM, específicamente en la versión 2.5.2.

1. 7. Limitaciones

No se trabajará con el Instituto Nacional de Transporte Terrestre (INTT), ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para Relaciones Interiores y Justicia, de la República Bolivariana de Venezuela. Por lo tanto, no se tendrá acceso directo a las estadísticas que posee referentes a las condiciones de tráfico que se presentan en la República Bolivariana de Venezuela

Se utilizarán las normas de funcionamiento de rotondas europeas.

El desarrollo de este trabajo no pretende ser una referencia absoluta para escenarios realistas de tráfico vehicular.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se habla sobre el tráfico vehicular, la vía pública, las tecnologías de simulación, la simulación basada en el agente y herramientas estadísticas utilizadas en el presente Trabajo Especial de Grado.

2. 1. El tráfico vehicular

El crecimiento de las ciudades siempre ha presentado un conjunto de problemas que son agravados a medida que aumenta la población en ellas. Poca planificación, expansión desordenada, vías escasamente planificadas y desarrolladas, gran cantidad de peatones, son algunos de los problemas que pueden enumerarse los cuales, a su vez, son consecuencia de una innumerable cantidad de variables que influyen los mismos (De Urraza Taberna, 2001).

Sin embargo, sin importar la situación, entre las necesidades de una persona siempre ha existido la necesidad de poder trasladarse. Los destinos, los motivos y los medios para cumplir esta necesidad son muchos actualmente y, sumado al incremento poblacional existente en cualquier ciudad, resulta un verdadero problema el poder movilizar a toda esta masa de personas desde un origen hasta un destino.

Entre los medios que permiten realizar esta actividad se encuentran los autobuses, las bicicletas y motocicletas, vehículos de carga pesada (como camiones), vehículos particulares (como carros y camionetas) y, por supuesto, los peatones.

Todas estas personas que se desplazan deben poder hacerlo de una manera segura y rápida, para lo que la humanidad ha inventado distintos recursos para poder administrar adecuadamente todo este flujo; entre estos pueden ser mencionadas las aceras, los pasos peatonales, los semáforos y las rotondas.

La rotonda, redoma o glorita, es un tipo especial de intercepción la cual es instalada como un dispositivo de administración del tráfico donde distintas vías de circulación convergen a un anillo de circulación donde se establece una circulación

giratoria alrededor de un islote central. Este elemento impide que los conductores establezcan conexiones directas entre los distintos orígenes y destinos, protegidos a su vez por isletas separadoras que dirigen el tráfico para evitar colisiones (Del Val, 2002) y (Canosa Zamora & García Carballo, 2009).

En su lugar, las conexiones se establecen siguiendo una calzada de circulación entorno al islote central, lo que permite reducir los puntos de conflictos entre los vehículos y la complejidad (y frecuencia) de las decisiones que deben ser tomadas. (Gobierno de España, 2013), (Gerencia Municipal de Urbanismo, 2000) y (Del Val, 2002).

Su implementación permite un incremento en el flujo vehicular en la intersección así como un aumento en la velocidad promedio en las cercanías de la misma, pero a su vez ocasiona complejos fenómenos en las proximidades de otras intersecciones, debido al efecto de la interconexión vial (Armas Zapata, 2011).

Con los años se ha producido un incremento cada vez más abrupto del tráfico de vehículos motorizados, generalizando y extendiendo sus usos hasta el punto de formar parte importante de la vida cotidiana y convertirse en uno de los factores importantes en la libertad de circulación que tienen las personas. (Fernández Isabel, 2010) y (Gobierno de España, 2013)

Esto implica una existencia y una utilización masiva de vehículos a motor. Debido a esto, es necesario establecer un conjunto de normas y regulaciones con el objeto de la protección de las personas y de los espacios públicos. (Gobierno de España, 2013)

Con el incremento del número de vehículos motorizados nuevamente se han presentado serios problemas para trasladarse, debido a que el volumen de vehículos llega a superar la capacidad con la que cuentan las vías de circulación, lo que ocasiona la formación de extensos congestionamientos.

Establecer regulaciones de tráfico resulta ser altamente complejo debido a la magnitud del problema y al comportamiento claramente no lineal, lo que dificulta

determinar el efecto que pueda tener el establecer alguna política de regulación (Martínez, 2005).

Entre algunas consecuencias del incremento del tráfico se observa el aumento del tiempo total de desplazamiento, el nivel de contaminación en las ciudades, el estrés en las personas, el nivel de accidentes, entre otras.

Tantas consecuencias asociadas hacen que sea de gran importancia estudiar los factores que influyen en el tráfico, su evolución y las relaciones existentes; para lo que las herramientas computacionales han demostrado ser de gran utilidad. (Fernández Isabel, 2010) y (Martínez, 2005)

Gracias a los avances en el área informática, se ha podido diseñar distintas herramientas que permiten estudiar y gestionar de manera inteligente el tráfico y planificar el desarrollo de las ciudades. Dichas técnicas han sido ampliamente utilizadas en países desarrollados, pero en los países en vías de desarrollo su utilización es relativamente novedosa (Rueda & Rico, 2007).

Entre estas herramientas se puede mencionar la programación de los semáforos, estudiar la utilización de los carriles en las intersecciones semaforizadas, estudio de las estrategias de control más utilizadas, métodos analíticos de simulación y métodos computacionales. (Pedraza, Hernández, & López, 2012) y (Fernández Isabel, 2010). Estos estudios demuestran el interés que existe en la actualidad por atender una mayor capacidad de vehículos en una misma distancia y permitir una mejor circulación..

Para una adecuada gestión de la red vial no es suficiente con el empleo de las regulaciones de las normas de tránsito debido a que estas desempeñan un papel complementario del diseño; es decir, la propia red viaria debe influir en la velocidad con la que se desplazan los usuarios. Para esto se establece una velocidad de referencia para el diseño del perfil con el que contará la vía; es decir, permite establecer elementos tales como radios de giro, pendientes, peraltes, distancia entre

intersecciones, reguladores de velocidad, entre otros (Gerencia Municipal de Urbanismo, 2000)

2. 2. La vía pública

El Plan General de Ordenación Urbana de Madrid (Gerencia Municipal de Urbanismo, 2000) establece que la vía pública son aquellos espacios de dominio y uso público cuya función es permitir el movimiento de los peatones, los vehículos (de uso particular o de carga) y los medios de transporte colectivos, además de permitir la permanencia de los peatones y el estacionamiento de los vehículos señalados.

La vía pública es clasificada en tres categorías las cuales son:

- Red viaria, dedicada a la circulación de peatones y vehículos, y al estacionamiento de estos últimos.
- Área estancial, se encuentran adyacentes a la red viaria y permite la permanencia de los peatones y su interacción social
- Plataforma reservada, son aquellas bandas diseñadas para ser utilizadas por un tipo particular de modo de transporte.

Por su parte, la red viaria de la vía pública se subdivide en dos grupos de acuerdo a sus características de diseño y a la función a la cual estén destinadas. La red viaria principal permite la movilidad y accesibilidad metropolitana, urbana y distrital. La red viaria secundaria posee un carácter local y su función es la de permitir el acceso a los usos situados en sus márgenes.

La red principal de la vía pública se divide en las siguientes categorías:

- La red viaria metropolitana, está diseñada para un elevado nivel de tráfico exclusivamente de vehículos motorizados para recorridos interurbanos o metropolitanos, tales como las autopistas.

- La red viaria urbana, maneja una gran capacidad de vehículos, preferentemente rodado, en recorridos metropolitanos o urbanos; tales como las grandes arterias viales.
- La red viaria distrital, está formada por vías colectoras-distribuidoras con actividades urbanas en sus bordes que ocasionan interacciones entre los vehículos y peatones.

Por su parte, la red secundaria de la vía pública se divide en:

- Las vías locales colectoras, conectan las redes locales a las redes principales.
- Las vías locales de acceso, permiten el acceso de los usuarios a los edificios e instalaciones.

2. 3. La simulación

Gracias a los avances en computación, hoy en día pueden estudiarse los complejos sistemas de la vida real con un mayor alcance y precisión gracias a la simulación por computadora. Las características de los sistemas reales pueden ser representadas por medio de un modelo representativo, una simplificación del mundo real (el cual es una entidad dinámica que reacciona a su entorno), y evaluadas matemáticamente; para así comprender, analizar e incluso mejorar las condiciones de operaciones que se presentan en el sistema. El gran potencial que presenta la convierte en una importante herramienta de la investigación de operaciones. (Gilbert & Troitzsch, 2005)

Los avances han permitido también un mayor desarrollo de las técnicas de simulación, facilitando ampliamente el desarrollo y análisis de los modelos representativos; sin embargo, hay destacar que el uso de las computadoras no es estrictamente necesario para poder simular (Rueda & Rico, 2007).

La simulación por computadora comprende un conjunto de actividades por medio del cual se estudia un sistema real por medio de un modelo lógico-matemático,

diseñado para imitar las características con las que este se comporta, con el fin de realizar experimentos numéricos para comprender mejor el comportamiento del sistema real (Rueda & Rico, 2007) y (Kelton, Sadowski, & Sadowski, 1998).

El aumento en popularidad de la simulación como herramienta de investigación de operaciones se debe, entre otras razones, a la capacidad de estudiar sistemas altamente complejos de una forma fácil y rápida, y analizar directamente sobre resultados obtenidos. Por otro lado, se ha convertido en una versátil, poderosa y económica herramienta debido a que se pueden estudiar sistemas propuestos cuya materialización puede ser muy complicada o muy costosa (Kelton, Sadowski, & Sadowski, 1998) y (Martinez, 2005).

2. 3. 1. Tipos de simulación

Entre las dimensiones que podemos utilizar para clasificar los tipos de simulación encontramos la relevancia que tiene el tiempo para el sistema, la manera en que cambian las variables de estado del modelo durante la simulación y, por último, los valores de entrada del modelo.

Cuando el tiempo no desempeña su función natural en la simulación nos encontramos en presencia de modelos estáticos, el caso contrario son los modelos dinámicos. Un sistema discreto es aquel donde las variables de estado cambian en instantes discretos de tiempo; por lo contrario, en los sistemas continuos las variables de estado cambian continuamente en el tiempo. Cuando se conoce con precisión los valores de entrada que modifican las variables del modelo, nos encontramos en el caso de modelos determinísticos; por otro lado, en caso de que las variables puedan tomar cualquier valor aleatorio, nos encontramos ante modelos estocásticos (Kelton, Sadowski, & Sadowski, 1998)

La simulación también puede ser clasificada en métodos analíticos y métodos computacionales. Los primeros son capaces de trabajar con sistemas de gran tamaño buscando capturar sus características generales en expresiones matemáticas, aunque esto implique tratar de manera muy simplificada las características microscópicas.

Los segundos permiten establecer interacciones entre distintos elementos logrando una mejor relación entre los principios generales del sistema y la representación de los componentes individuales, pero en el modelado puede ser difícil conseguir una adecuada correspondencia entre las entidades computacionales manejadas y los conceptos reales asociados (Fernández Isabel, 2010)

2. 3. 2. Elementos de un sistema

En los distintos modelos de simulación podemos encontrar una diversidad de elementos, los cuales interactúan entre sí y permiten que el modelo pueda funcionar. De acuerdo a (Kelton, Sadowski, & Sadowski, 1998) y a (De Urraza Taberna, 2001) podemos encontrar los siguientes elementos:

- Entidades: Son objetos dinámicos que pueden cambiar su estado, reconocer, afectar y ser afectadas por otras entidades, y modificar su entorno. Estos deben ser creados por el usuario o por el programa de simulación.
- Atributos: Son el conjunto de características, comunes entre todas las entidades, que permiten diferenciar una de otra, dependiendo del valor asignado en cada caso.
- Variables: Son valores globales que pueden ser modificados y tienen por objeto reflejar algunas características del sistema. No pertenecen a una entidad en particular pero afectan a todo el sistema.
- Recursos: Son elementos que son procesados por las entidades, quienes compiten entre ellas por tomar un recurso. Cuando una entidad se encuentra disponible, selecciona un recurso y luego lo suelta cuando este ha sido procesado. Los recursos son asignados a las entidades y no al revés.
- Colas: Estas se presentan cuando las entidades no pueden moverse y necesitan un lugar para esperar hasta que puedan hacerlo nuevamente.
- Evento: Es una actividad que ocurre en un instante de tiempo de simulación. Ocasionalmente que las variables, los atributos y las entidades cambien de estado.

- Reloj de simulación: No se comporta igual que el reloj normal ya que avanza entre la ocurrencia de un evento y otro. Es decir, al terminar un evento el reloj avanzará hasta el instante en que ocurre el siguiente evento. Mientras no existan cambios entre los eventos, no hay necesidad de gastar tiempo real buscando un tiempo simulado que no tiene importancia.
- Condiciones de inicio y de finalización: Son condiciones que el usuario debe establecer para que el modelo pueda iniciar correctamente y detenerse posteriormente, ya sea por alcanzar algún tiempo particular de simulación o cuando ocurra algún evento que obligue a detener el modelo.

2. 3. 3. Simulación con SeSAM

El nombre del software con el que se simula en el presente trabajo es SeSAM, cuyo nombre proviene de Shell for Simulated Agent Systems, el cual es un ambiente de desarrollo para la simulación de sistemas de agentes.

Desarrollado en la Universidad de Würzburg, Alemania, y distribuido gratuitamente, es un programa académico que permite modelar y experimentar utilizando un enfoque de modelado basado en el agente (ABMs, de las siglas en inglés Agent-Based Models). Es decir, cada agente que conforma el modelo posee un conjunto de variables y un razonamiento que le permite reaccionar ante las distintas situaciones que puedan presentarse. (SeSAM, 2011).

El razonamiento de los agentes consiste en un conjunto de actividades conectadas por reglas las cuales el usuario establece en un ambiente similar a los diagramas de flujos; así el usuario puede diseñar la simulación sin programar directamente en el lenguaje con que trabaja el programa, el cual es JAVA.

Debido a la complejidad de los sistemas que son simulados por medio de las técnicas basadas en los agentes, y a las relaciones involucradas, es necesario utilizar una computadora y un programa computacional adecuado que permita desarrollar los modelos fácilmente (Macal & North, 2010)

2. 3. 4. Simulación basada en el agente

Al trabajar con sistemas sociales (Gilbert & Troitzsch, 2005) señalan que existe un comportamiento emergente a partir de las interacciones que se presentan entre los miembros que la componen; y que no es obvio, o no puede ser observado, cuando se estudia a un miembro en particular. En sociedades humanas, cada persona puede reconocer, razonar y reaccionar ante los eventos, y personas, que se encuentran presentes en su entorno (inmediato o no); esta capacidad ocasiona un comportamiento particular característico de las sociedades humanas.

De acuerdo a (Macal & North, 2010) los métodos de modelado y simulado basados en el agente constituyen una manera de representar sistemas sociales complejos en los cuales existen agentes con un comportamiento asociado que les permite interactuar y relacionarse con otros agentes.

Estos métodos se concentran en la forma de razonar de los agentes al interactuar con su entorno. No cuentan con una autoridad que gestione sus comportamientos manera global; es decir, son sistemas descentralizados. Esto permite conocer patrones y estructuras, que surgen al momento en que los agentes comienzan a interactuar con su entorno, que no fueron indicados explícitamente en los agentes.

Los modelos basados en los agentes poseen tres elementos:

- Un grupo de agentes.
- Un conjunto de métodos de interacción de los agentes, compuesto por un conjunto de condiciones implícitas que definen cómo y cuándo los agentes se relacionan.
- El medio ambiente, con el cual los agentes también interactúan.

Los agentes son organismos identificables, autónomos y dotados de comportamientos, y atributos, que les permite responder ante las situaciones que se presentan. Estas características los convierten en entes activos capaces de cooperar, negociar y coordinarse con otras entidades y con su entorno con la finalidad de alcanzar sus propias metas (Álvarez & Soto, 2008).

Además, son individuos capaces de socializar con otros agentes por medio de protocolos de comunicación que permiten que ambos puedan influir en el comportamiento del otro.

Al igual que ocurre en la realidad, los agentes no interaccionan con todos los elementos al mismo tiempo. Las relaciones sólo ocurren entre vecinos cercanos. De igual forma, no recogen información de todo el ambiente sino solo con el de su vecindario. El medio ambiente se encarga de proveer la información espacial así como un conjunto de información de valor para los agentes (SeSAm, 2011).

Debido a los procesos simultáneos, los niveles de razonamiento y observación, los parámetros de comportamiento del agente, la falta de un ambiente de trabajo unificado, entre otras razones, los modelos basados en agentes resultan ser de gran complejidad (Klügl, Oechslein, Puppe, & Dornhaus, 2004).

2. 3. 5. Elementos de SeSAm

El tutorial de SeSAm define los siguientes elementos que son manejados por el programa:

- Actividades: Son elementos del razonamiento de los agentes compuestas por acciones que son ejecutadas cuando el agente se encuentra en ellas. Se encuentran conectadas con otras actividades por medio de reglas, que indican cuando puede iniciarse la siguiente actividad.
- Agentes: Son entidades activas de la simulación constituidas por un organismo que cuenta con variables y con un motor de razonamiento, que es implementado por medio del Lenguaje Unificado de Modelado (UML, por las siglas en inglés de Unified Modeling Language). Por medio de las variables se define el estado del agente y el motor de razonamiento funciona para definir su comportamiento. El motor consta de actividades conectadas entre sí por medio de reglas, que permiten que el agente siempre esté en alguna actividad.

- Depurador: Permite encontrar errores en la simulación, para esto se puede seguir el orden de los eventos en cada iteración o definiendo puntos de parada (en inglés conocidos como “breakpoints”) que detienen la simulación al alcanzar ciertos puntos particulares.
- Emergencias: Son actividades cuyas reglas son revisadas por el programa en cada tiempo de simulación, y ejecutadas cuando las condiciones se cumplan. En caso de que las condiciones se encuentren mal planteadas, se perderá rapidez de ejecución de la simulación.
- Experimentos: Permite realizar varias simulaciones de un modelo y recolectar información sobre este, cambiando alguna variable entre cada una de las simulaciones
- Mapa de situaciones: Contiene la información espacial de los agentes y los recursos que se encuentran en el mundo. Es posible extenderlo (o contraerlo), dividir en cuadrículas y establecer si es un mapa toroide (es decir sin fronteras). Originalmente posee una forma cuadrada como se muestra en la figura 1. Las coordenadas de las abscisas aumentan de izquierda a derecha, y las coordenadas de las ordenadas aumentan de arriba hacia abajo.

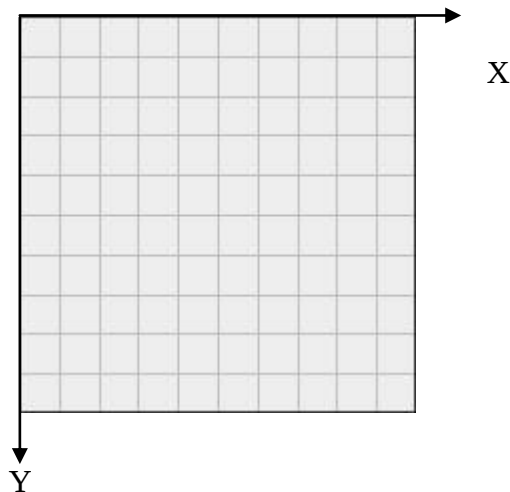


FIGURA 1.- IMAGEN DEL MAPA DE SeSAM.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

- Mundo: Representa el entorno donde los agentes y los recursos se desenvuelven y tiene como función determinar la influencia externa sobre estos. Posee variables de estado y un motor de razonamiento al igual que los agentes.
- Recursos: Son entidades de la simulación que interactúan con los agentes. Posen variables pero no motor de razonamiento como los agentes.
- Reglas: Son condiciones que permiten que se ejecuten actividades, se representan por medio de líneas que conectan las actividades entre sí.
- Situaciones: Son configuraciones de agentes, recursos y mundos dispuestos de manera que pueda realizarse la simulación.

2. 4. Pruebas de hipótesis

Al momento de realizar una investigación, son establecidas hipótesis relacionadas con cierta teoría y recolectada información que permitan decidir al respecto. De esta manera, se puede aceptar, revisar o rechazar dichas hipótesis y la teoría de la cual se originó.

Para decidir correctamente, es necesario utilizar métodos objetivos que permitan comparar la información recolectada y establecer el riesgo dispuesto a aceptar en caso de que la hipótesis sea incorrecta (Siegel & Castellan, 2007).

2. 4. 1. La hipótesis nula

La hipótesis nula (H_0) es una hipótesis de no efecto formulada, generalmente, con la finalidad de ser rechazada. Al hacerlo, se apoya la hipótesis alterna la cual es la declaración operacional de la hipótesis de investigación del experimentador y se plantea como lo opuesto de la hipótesis nula. Sin embargo, cabe destacar que aceptar la hipótesis alterna no significa que la misma sea cierta (Siegel & Castellan, 2007).

2. 4. 2. Nivel de significación

Generalmente denotada como α y conocida también como “error tipo I”, corresponde al riesgo que corre el investigador de rechazar la hipótesis nula cuando la misma es cierta, debido a que la muestra recolectada para decidir es inconsistente con dicha hipótesis y es un peligro que existe en cualquier inferencia estadística.

Comúnmente toma valores iguales a 1% y 5%, pero cualquier otro valor puede ser determinado por el investigador gracias a alguna estimación de la importancia o de la significación práctica del resultado que será obtenido. Mientras más grande sea este valor será más probable que la hipótesis nula sea rechazada equivocadamente (Siegel & Castellan, 2007).

2. 4. 3 Valor de probabilidad Pvalor

El nivel crítico P, o Pvalor, de una prueba estadística representa el menor nivel de significación que conduce al rechazo de la hipótesis nula cuando la misma es correcta. Es decir, si el nivel de significación es mayor que el Pvalor la decisión es rechazar la hipótesis nula (Fernández Loureiro & García, 2007).

2. 5. Pruebas de la bondad de ajuste

Para determinar la distribución que sigue la muestra con la que se trabaja, se compara la misma con una distribución teórica; es decir, se comparan los valores recolectados con aquellos que se espera obtener en caso de que los datos sigan una distribución particular (Siegel & Castellan, 2007).

En este caso, la hipótesis nula será que los datos si se ajusten a dicha distribución y, por la tanto, la hipótesis alterna será que no se ajusten.

Sin embargo, una sola prueba de bondad de ajuste no debe ser suficiente para aceptar la afirmación de la hipótesis nula. En lugar de aceptar, estas pruebas dan como resultado no rechazar dicha hipótesis si existe poca diferencia entre los valores observados y esperados (Siegel & Castellan, 2007).

2. 5. 1. Contraste chi-cuadrada de bondad de ajuste

Diseñado por Pearson en el año 1900 para su aplicación a poblaciones discretas, su se extendió luego a poblaciones continuas. De acuerdo a (López Casuso, 1984), es utilizada para decidir cuándo un conjunto de datos siguen una distribución de probabilidad teórica, la prueba de hipótesis que se realiza es la siguiente:

H_0 : Los datos se ajustan a una distribución de probabilidad conocida: $F(x) = F_0(x)$

H_1 : Los datos no se ajustan a una distribución conocida: $F(x) \neq F_0(x)$

Para realizar este contraste, se recolecta una muestra de tamaño n (realizando el experimento n veces de manera independiente) y se calculan las frecuencias de cada resultado a las que designamos $f_1, f_2, \dots, f_r$, siendo f_i la frecuencia del resultado i .

Las frecuencias teóricas o esperadas vendrán dadas por $f_i^0 = n \cdot p_i^0$; es decir, f_i^0 es la frecuencia con que se espera observar un resultado i si p_i^0 fuese la probabilidad con la que se diese ese resultado en un intento. Obtenido esto, se procede a medir la diferencia que existe entre ambos grupos de valores por medio de la siguiente ecuación, donde k es el número de categorías en la clasificación (López Casuso, 1984), (Siegel & Castellan, 2007) y (Canavos, 1988).

$$\text{Ecuación 1} \quad X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - f_i^0)^2}{f_i^0}$$

Para poder realizar el contraste de hipótesis, se compara el valor anterior con el de una distribución chi-cuadrada de $k-1$ grados de libertad y un nivel de significación α , (López Casuso, 1984) y (Siegel & Castellan, 2007).

$$\text{Ecuación 2} \quad \text{Si } X^2 < X^2_{\alpha, k-1} \text{ se acepta } H_0$$

2. 5. 2. Prueba de Kolmogorov-Smirnov de una muestra

Esta prueba sirve, al igual que la prueba anterior, para comparar los datos muestrales recolectados con una función de distribución teórica. Al igual que en la prueba chi-cuadrada, se realiza la siguiente prueba de hipótesis (Canavos, 1988).

H_0 : Los datos se ajustan a una distribución de probabilidad conocida: $F(x) = F_0(x)$

H_1 : Los datos no se ajustan a una distribución conocida: $F(x) \neq F_0(x)$

Sin embargo, en esta prueba no necesita que los datos estén agrupados, es aplicable a tamaños pequeños de muestras y se utiliza solo cuando los valores muestrales siguen una distribución continua y la función de distribución con la que se quiere comparar se encuentra completamente especificada (Canavos, 1988).

De acuerdo a (Canavos, 1988) y a (López Casuso, 1984), para realizar el contraste se procede de la siguiente manera:

1. Se ordenan los datos muestrales de menor a mayor, designándolos $x_1, x_2, \dots, x_n$.
2. Siendo k el número de elementos de la muestra menores o iguales a x , se determina la función de distribución relativa muestral de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 3} \quad F(x) = \begin{cases} 0 & , x < x_1 \\ \frac{k}{n} & , x_k \leq x < x_{k+1} \\ 1 & , x \geq x_k \end{cases}$$

3. Dada la función de distribución teórica $F_0(x)$, la prueba se enfoca en las desviaciones más grandes por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 4} \quad D = \max_x |F(x) - F_0(x)|$$

4. La distribución muestral de D es conocida y se encuentra tabulada en función del nivel de significación y del tamaño de la muestra recolectada. Por lo tanto, para realizar el contraste de hipótesis se realiza la siguiente comparación.

$$\text{Ecuación 5} \quad \text{Si } D > D_{n,\alpha} \text{ se rechaza } H_0$$

2. 5. 3. Distribución exponencial negativa

Resulta un caso especial de las distribuciones Weibull y Gama donde la variable aleatoria permite representar el tiempo que transcurre hasta que se presenta el primer evento Poisson. Es decir, permite modelar el lapso de tiempo que existe entre dos eventos consecutivos que transcurren de manera independiente y a una frecuencia constante (Canavos, 1988).

Presenta las funciones de densidad y de distribución mostradas a continuación, donde θ representa el lapso de tiempo promedio entre dos eventos independientes de Poisson.

$$\text{Ecuación 6} \quad f(x; \theta) = \begin{cases} \frac{1}{\theta} \exp\left(\frac{-x}{\theta}\right) & x > 0, \theta > 0 \\ 0 & \text{Para cualquier otro valor} \end{cases}$$

$$\text{Ecuación 7} \quad P(X \leq x) = F(x; \theta) = 1 - \exp\left(\frac{-x}{\theta}\right)$$

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se explica el tipo de investigación y las fases de investigación a desarrollar en el presente trabajo.

3. 1. Tipo de investigación

Para el desarrollo del presente trabajo se ha utilizado una metodología de modelado evolutivo con el objeto de desarrollar software de alta calidad de manera incremental.

Particularmente será aplicada la metodología de modelado en espiral la cual combina la construcción de prototipos con el modelado en cascada para permitir introducir mejoras de diseño y codificación del sistema a partir de la realimentación del modelo y de nuevos requerimientos detectados en el sistema, con el objeto de incluir nuevos aspectos no contemplados en un principio en una serie de entregas evolutivas (Pressman, 2002).

3. 2. Fases de la metodología

Las etapas de la metodología del prototipo evolutivo para el diseño, desarrollo e implementación del sistema son descritas a continuación:

3. 1. 1. Comunicación

Durante esta fase se especifica la funcionalidad del sistema, para ello se necesita conocer los requerimientos del mismo así como lo que se espera del sistema. Esta etapa abarca la definición de los objetivos, alcances y limitaciones así como el estudio de las herramientas a utilizar en la fase de la decodificación.

De esta etapa se espera obtener las funciones básicas a realizar por el modelo y las características que lo limitan. De igual forma se espera establecer las herramientas con las que se trabajará y sus características propias.

En entregas posteriores, por medio de esta etapa serán identificadas las mejoras necesarias para el buen funcionamiento del modelo así como nuevos requerimientos del sistema.

3. 1. 2. Planeación

Esta etapa tiene como función el establecimiento de la metodología e itinerario de trabajo, el análisis de riesgos y la estimación en los costos involucrados.

3. 1. 3. Modelado

Son establecidos los análisis de los requerimientos y las funcionalidades involucrados, así como también el diseño de los elementos e interacciones necesarios para la ejecución del proyecto.

3. 1. 4. Construcción

Consiste en la codificación del modelo de simulación en base a los requerimientos analizados en la fase anterior y de la ejecución de las pruebas necesarias para la verificación de las funciones del sistema.

3. 1. 5. Despliegue

En esta etapa se hace entrega del modelo de simulación al usuario, con el objeto de que realice pruebas y valide si se cumple con la definición de sus requerimientos. En caso de no ser aprobado completamente por el usuario, se regresa a la primera fase de la metodología considerando las observaciones pertinentes.

El primer recorrido alrededor de la espiral quizás genere el desarrollo de alguna de las especificaciones, o incluso tener que ser desechada; sin embargo, los siguientes pasos alrededor de la espiral servirán para elaborar versiones más sofisticadas del sistema.

Comparando esta metodología con la vida real, el primer recorrido puede representar un desarrollo del concepto de un nuevo producto. Cumplido este primer recorrido, el siguiente correspondería al desarrollo del producto el cual continuará evolucionando realizando las etapas del modelado en espiral en repetidas ocasiones. Posteriormente, se tendría alguna etapa de mejoramiento del producto lo que continuaría con el ciclo evolutivo hasta que el producto es finalmente retirado (Pressman, 2002).

CAPÍTULO 4: ELABORACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

A continuación se describirán las características que poseen la rotonda y los vehículos, junto a las variables que influyen en sus movimientos, y la variable respuesta que nos permite determinar los cambios que acontecen en la simulación.

4. 1. Características del mapa

El mapa de la simulación es el espacio donde los distintos agentes y recursos interactúan mutuamente durante la simulación. Dependiendo de la situación estudiada, pueden establecerse distintos mapas donde la disposición que exista entre las distintas entidades sea diferente.

En el presente trabajo, se estableció que el mapa fuese cuadrado y no toroide con 360 unidades de extensión de cada lado. Además, el mapa fue cuadriculado con 720 filas y columnas; así se obtuvo una cuadrícula donde cada recuadro mide 0.5 unidades de longitud, lo que permite distribuir a los distintos elementos con mayor facilidad y precisión al momento de ubicarlos en el mapa.

4. 2. Diseño y ubicación de la rotonda

La rotonda se encuentra conformada por dos elementos: el islote central y las baldosas de circulación. Ordenadas, las baldosas conforman los canales de circulación para los vehículos. Su geometría afectará la capacidad debido a que influye en la distancia que mantienen los vehículos al circular, (Del Val, 2002).

4. 2. 1. El islote central

Obstáculo que no puede ser atravesado y alrededor del cual se establece la circulación giratoria de los Conductores. El islote central de la rotonda a trabajar es un recurso estático de forma cuadrada donde cada lado mide sesenta unidades de longitud, lo que permite diseñar una intersección simétrica. Tiene como función dar forma cuadrada a la intersección.

Además, se encuentra ubicado en el centro del mapa, lo que permite que exista simetría entre las distintas vías de entrada y de salida que convergen en esta.

De acuerdo a (Del Val, 2002), “el tamaño del islote central es principalmente determinado por el espacio disponible y la necesidad de obtener suficiente deflexión para restringir por medio de la velocidad del vehículo”. Redomas con un gran islote poseen una mayor capacidad de entrada, proveen separación entre las áreas de conflicto y le permite a los conductores que ingresan reconocer con mayor facilidad las intenciones de los conductores que se encuentran circulando.

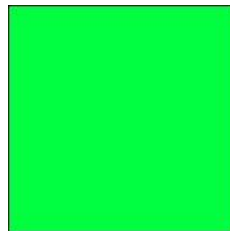


FIGURA 2.- ISLOTE CENTRAL.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

4. 2. 1. Baldosas de circulación

Las baldosas de circulación son recursos estáticos de forma cuadrada cuyos lados miden 2 unidades de longitud, lo que permite ubicarlas simétricamente en cualquier lugar y generar carriles de 2 unidades de ancho. Sobre ellas circularan vehículos particulares los cuales cuentan con una longitud y una anchura de 4,337 unidades y 1,743 unidades (respectivamente), tal como se explica posteriormente en la sección 4. 3. 1. Características físicas



FIGURA 3.- BALDOSAS DE CIRCULACIÓN INFERIOR Y SUPERIOR
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Ordenados alrededor del islote central, conforman los canales de circulación sobre los cuales los vehículos se desplazan. Para lograr correctamente esto último, suministran información por medio de las siguientes ocho variables:

Variables numéricas:

- Canal de circulación (canal): Indica a los vehículos si se encuentran en el carril 1 ó 3, como se explica posteriormente en la sección 4. 2. 2. Características de diseño
- Dirección de carril: Dependiendo de su ubicación, se le asignaron los siguientes valores: 0° , -90° , -180° y -270° . Estos valores negativos permiten que los conductores realicen el recorrido anti-horario alrededor de la rotonda.
- Número de carril de entrada: Identifica a las tres distintas entradas donde son creados los nuevos agentes “Conductor”.
- Número de carril de salida: Le informa a los vehículos cuál es la salida en la que deben girar cuando se encuentran en el anillo de circulación. Cuando esta variable corresponda con el número de salida que el carro se encuentra buscando, este podrá girar y salir de la redoma.
- Sector de redoma: Por medio de esta variable se divide la intercepción en seis sectores con el objeto de facilitar la ubicación espacial de los carros.

Variables dicotómicas:

- ¿Ceder el paso?: Esta variable le indica a los carros que se encuentran fuera de la redoma el lugar donde deben detenerse para ceder el paso a los otros, y

luego poder entrar en la redoma. De esta forma, los que se encuentran adentro tienen prioridad en la circulación (Del Val, 2002).

- ¿Es una esquina?: Tiene como función permitir que los vehículos puedan reconocer cuándo deben cambiar su dirección debido a que se encuentran en alguna de las esquinas de la intercepción. Tiene valor “verdadero” cuando la baldosa se encuentra en las esquinas de la rotonda o cuando la baldosa de circulación se encuentra en las entradas de la rotonda.
- ¿Fin del camino?: Sirve para indicar el lugar donde se encuentra el final del recorrido, lo que ocasiona que las entidades desaparezcan del mapa.
- ¿Impedir cambio de canal?: Por medio de esta variable se prohíbe que los carros puedan cambiarse de canal en cualquier lugar del recorrido. No se desea que puedan realizar este movimiento en las intercepciones de la redoma ni tampoco en sus esquinas, como se muestra en la siguiente figura.

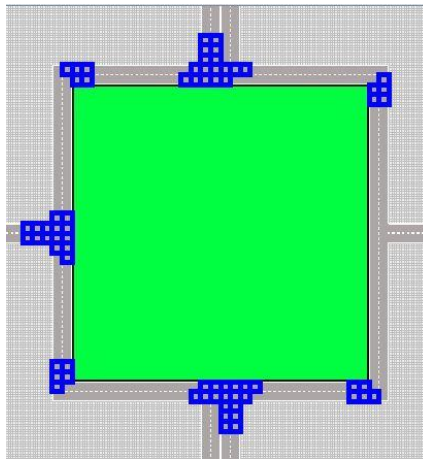


FIGURA 4.- BALDOSAS DE CIRCULACIÓN MARCADAS COMO “IMPEDIR CAMBIO DE CANAL”
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

4. 2. 2. Características de diseño

La rotonda posee una forma cuadrada donde cada lado del islote central posee sesenta unidades de longitud. A su alrededor se encuentra el anillo de circulación, constituido de baldosas de circulación, el cual se encuentra conformado por dos carriles cuya magnitud es de dos unidades de ancho cada uno. De esta forma se

obtiene, al sumar la longitud del islote central más el ancho total del anillo de circulación, que cada lado de la rotonda cuenta con un total de sesenta y ocho unidades de longitud.

El carril interno del anillo de circulación se encuentra identificado con el número 3 y el carril externo con el número 1. Los números de los carriles fueron asignados de manera arbitraria con la intención de que los vehículos puedan reconocer su posición con mayor facilidad.

Por este sistema solamente circularán vehículos particulares que interactuarán entre ellos para poder realizar el recorrido adecuadamente. Por lo que no será considerado el efecto de peatones, vehículos de carga, semáforos, entre otros.

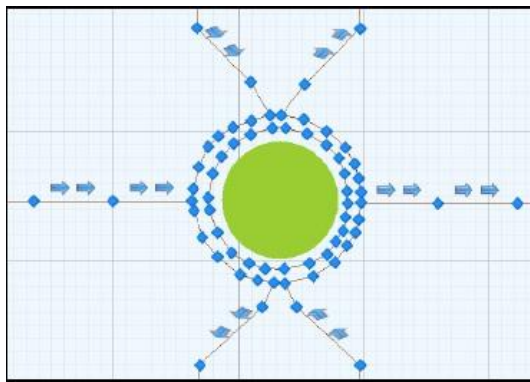


FIGURA 5.- ROTONDA TIPO 1.
FUENTE: ROBLES (2012)

Inspirado en la rotonda tipo 1 utilizada por Robles (2012), la intercepción formaría parte de una red viaria urbana a la que convergen tres caminos distribuidos de la siguiente forma:

- Entrada número 1: Ubicada en el lado superior de la rotonda.
- Entrada número 2: Ubicada en el lado izquierdo.
- Entrada número 3: Ubicada en el lado inferior.

Los números fueron asignados de manera arbitraria con el único objeto de identificarlas. De igual forma, la rotonda cuenta con tres salidas distribuidas como se indica a continuación:

- Salida número 1: Ubicada en el lado superior de la rotonda.
- Salida número 2: Ubicada en el lado inferior.
- Salida número 3: Ubicada en el lado derecho.

Así como se tienen dos carriles en el anillo de circulación, también se tienen dos carriles para la circulación de los vehículos tanto en las vías de entrada como de salida de la rotonda. De acuerdo a (Del Val, 2002), es usualmente aceptado para el diseño que se tengan la misma cantidad de carriles en las entradas de la rotonda y en el anillo de circulación. La distribución de las entradas y salidas es mostrada en la siguiente figura.

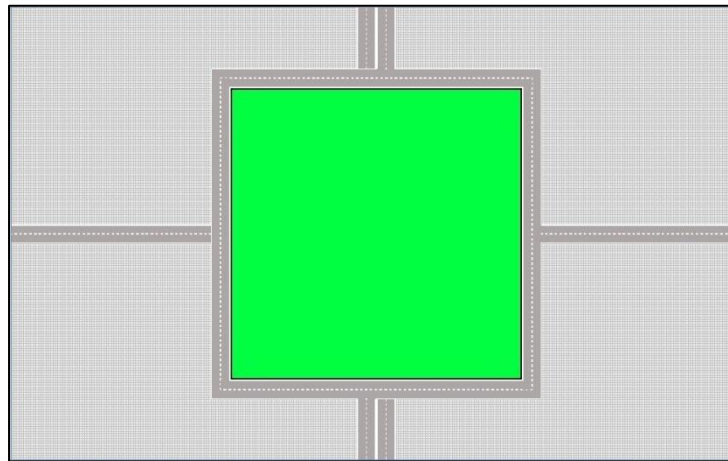


FIGURA 6.- VISTA CERCANA DE LA ROTONDA CUADRADA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Por otro lado, la rotonda se encuentra dividida en seis sectores que permiten a los vehículos moverse y tomar decisiones con mayor facilidad en la simulación.

Esta información solo sirve para identificar las distintas zonas y en ningún momento para priorizar. Al desplazarse por las vías, los carros toman esta información directamente de las baldosas de circulación. Estos sectores son:

- Sector 0: Sirve para identificar a los carriles que se encuentran en las vías de entrada y salidas (en toda su extensión).

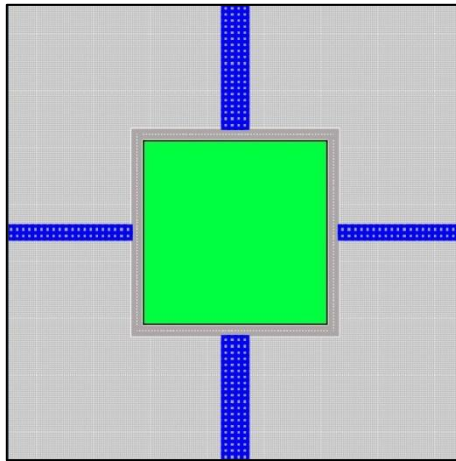


FIGURA 7.- SECTOR 0 DE LA ROTONDA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

- Sector 1: Identifica al lado superior de los carriles del anillo de circulación de la rotonda y corresponde con el número de la salida que se encuentra en este mismo lado, abarcando 54 unidades centrales de longitud de dicho lado. La dirección de las baldosas de circulación tienen valor -180 , lo que permitirá que los vehículos se desplacen de derecha a izquierda.

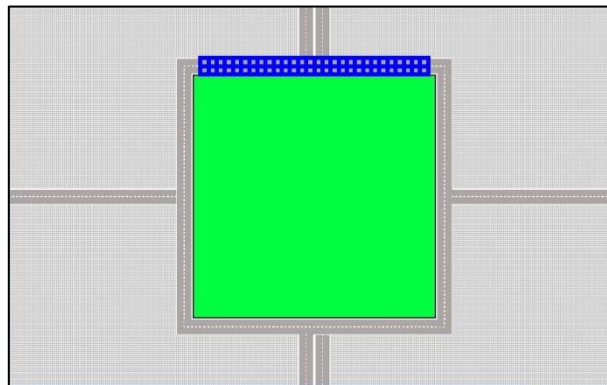


FIGURA 8.- SECTOR 1 DE LA ROTONDA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

- Sector 2: Identifica al lado inferior de los carriles del anillo de circulación de la rotonda y corresponde con el número de la salida que se encuentra en este mismo lado, abarcando igualmente 54 unidades. La dirección de las baldosas de circulación que componen este sector tiene valor 0 , lo que permitirá que los vehículos se desplacen de izquierda a derecha al seguir la ruta.

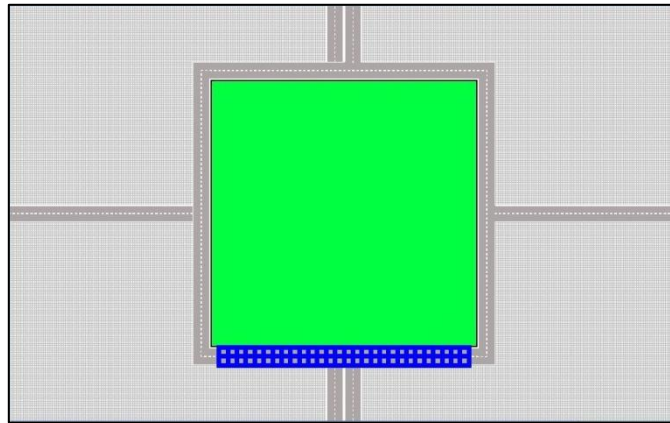


FIGURA 9.- SECTOR 2 DE LA ROTONDA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

- Sector 3: Identifica al lado derecho de los carriles del anillo de circulación de la rotonda y corresponde con el número de la salida que se encuentra en este lado. En esta ocasión, se les asignó el valor -90 a la dirección de las baldosas de circulación; así los vehículos pueden desplazarse de abajo hacia arriba.

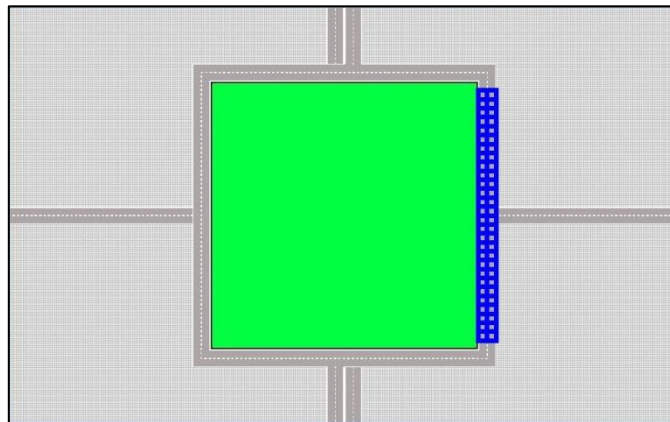


FIGURA 10.- SECTOR 3 DE LA ROTONDA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

- Sector 4: Identifica al lado izquierdo de los carriles del anillo de circulación de la rotonda, con una longitud igual a los sectores anteriores. A diferencia de los tres sectores anteriores, este valor no corresponde con ninguna salida. En esta ocasión, se les asignó el valor -270 a la dirección de las baldosas de circulación que componen este sector; de esta forma, los vehículos pueden desplazarse de arriba hacia abajo al seguir la ruta de las baldosas.

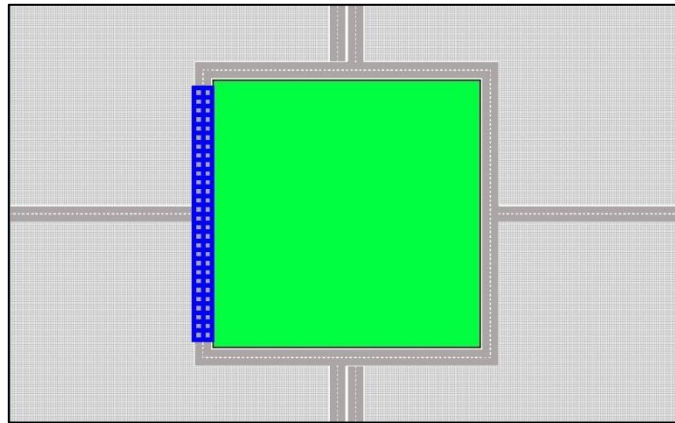


FIGURA 11.- SECTOR 4 DE LA ROTONDA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

- Sector 5: Identifica a las baldosas ubicadas en las esquinas. Al vehículo seguir la ruta, realizará el giro al observar que las baldosas cambian de dirección. En este sector se encuentra una prohibición de cambiarse de canal.

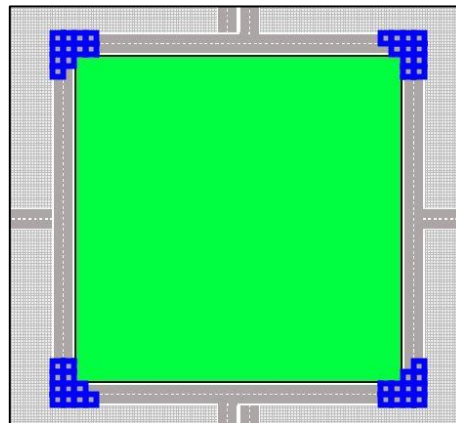


FIGURA 12.- SECTOR 5 DE LA ROTONDA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En cada sector, las baldosas de circulación tienen valores diferentes de dirección debido a que cuando los vehículos entran en el anillo de circulación de la rotonda estos deben girar en sentido anti-horario, (Gerencia Municipal de Urbanismo, 2000). De esta forma, los vehículos siempre encontrarán sus respectivas salidas del lado derecho.

4. 2. 3. Dimensiones y ubicación espacial

El centro del islote central se encuentra ubicado en el centro del mapa del simulador; es decir, a ciento ochenta unidades del lado superior y a la misma distancia del lado izquierdo del origen de coordenadas del mapa. De igual forma, las entradas y salidas se encuentran en los centros de cada uno de sus lados.

Como se pudo apreciar anteriormente en la FIGURA 6.- VISTA CERCANA DE LA ROTONDA CUADRADA., por el lado superior, en el sector número 1 de la rotonda, se encuentran dos carriles para la entrada y otros dos para la salida, los cuales se encuentran igualmente identificados con el número 1; con una anchura total de 8 unidades y una extensión de 146 unidades. Las entradas y las salidas que se encuentran en el lado inferior de la redoma, sector 2, tienen las mismas dimensiones; sin embargo, la entrada se encuentra marcada con el número 3 y la salida con el número 2, como se explicó anteriormente en la sección 4. 2. 2. Características de diseño

En el lado derecho de la rotonda, sector 3, se encuentran dos carriles para la salida número 3, identificados con el mismo número. La entrada ubicada en el lado izquierdo de la redoma, sector 4, se encuentra identificada como entrada número 2. Ambas poseen con una anchura total de 4 unidades y una extensión de 146 unidades.

4. 3. Diseño de los vehículos

Identificados con el nombre de “Conductor”, son agentes capaces de interactuar con los distintos elementos de su entorno y responder ante las situaciones que se presenten. Cuentan con un conjunto de variables, que definen su estado, y con un motor de razonamiento, que les permite tomar decisiones ante los eventos que se presenten.

4. 3. 1. Características físicas

Tras una evaluación de las dimensiones promedio de cien vehículos de uso particular que se encuentran a la venta actualmente en el país (ver Anexo 12), fue establecido para cada vehículo una longitud y una anchura de 4,337 unidades y 1,743 unidades, respectivamente.

Los agentes tienen igual probabilidad de ser creados en cualquiera de las tres entradas, siendo igual a $1/3$; así como en cualquiera de sus dos carriles, con probabilidad igual a $1/2$. Debido a que es una simulación no toroide, al terminar el recorrido establecido dichas entidades deben desaparecer; es decir, siempre hay nuevos carros ingresando y debe evitarse su acumulación al final del recorrido.

Por último, en este Trabajo fue establecido que los vehículos se desplazaran con una rapidez constante de 1 unidad por cada segundo de simulación.

4. 3. 2. Características de las variables

Cada agente “Conductor” posee treinta variables que permiten definir su estado e interactuar con otras entidades. Cada uno cuentan con quince variables numéricas, ocho dicotómicas, seis variables de entidades y una variable de posición. Algunas de estas no pueden ser percibidas por otros agentes; es decir, algunas son variables internas.

4. 3. 2. 1. Variables numéricas

Por medio de este grupo de variables se establecen aquellos valores numéricos que permiten definir el estado de los agentes. Para esto se cuenta con las siguientes quince variables numéricas:

- Angulo 30°: Como su nombre indica, esta variable posee un valor constante e igual a 30. Es una variable interna cuya función es la de establecer en los Conductores un área de observación de otras entidades.
- Angulo 45°: De igual forma que la variable anterior, establece un área de observación de entidades pero con un valor constante igual a 45.
- Angulo 90°: Igualmente, establece un área de observación pero con un valor constante igual a 90.
- Canal de circulación (carro): Indica si el vehículo se encuentra en el carril 1 ó 3. Puede ser modificada, cuando los carros se cambian de canal, y puede ser apreciada por otros Conductores.
- Dirección carro: Los vehículos siguen el recorrido anti-horario del anillo de circulación de la redoma por medio de esta variable. Dependiendo de su ubicación, los carros pueden modificar esta variable entre los siguientes valores: 0°, -90°, -180° y -270°. Otros agentes utilizan esta información con el objeto de determinar si sus direcciones son iguales y tomar las previsiones necesarias.
- Número de cambios de canal: Variable interna de cada agente cuya función es indicar la cantidad de veces que se ha cambiado de canal en un sector de redoma, al cambiar de sector se restablece el valor en 0.
- Número de carril de entrada (carro): Indica en cuál de las tres entradas ha sido creado un agente. Esta información es utilizada para reconocer la baldosa de circulación donde el mismo debe detenerse para ceder el paso en la rotonda y, una vez adentro, dónde se debe girar para incorporarse al flujo vehicular.
- Número de carril de salida (carro): Informa cuál es la salida que debe buscarse al circular en la redoma. Para esto selecciona aleatoriamente un valor entre las tres opciones de salidas (entre 1 y 3) al momento de ser creado el Conductor, y permanece constante durante la simulación.
- Número de giros realizados: Variable interna cuyo objeto es contar la cantidad de esquinas en las que se ha girado dentro de la rotonda; cuando posea un valor igual a 4 significará que se ha realizado una vuelta completa.

- Obstáculo muy cerca: Variable interna del agente que tiene un valor constante de 6 unidades con el objeto de establecer el momento en que es inminente realizar una acción, tal como frenar, debido a la proximidad de otra entidad.
- Obstáculo muy lejos: Posee un valor constante de 10 unidades con el propósito de establecer el momento en que una entidad entra (o sale) del área de percepción del agente. También es una variable interna.
- Tiempo de recorrido: Permite a los carros registrar el tiempo de simulación en el que fueron creados. Posteriormente, al entrar en la acción de “Desaparecer”, permite establecer las diferencias de tiempo de simulación para determinar cuánto tiempo permanecieron en el sistema.
- Tiempo frenado: Por medio de esta variable interna se establece un límite en el tiempo que un carro permanece estático, no aplica al encontrarse esperando para cambiar de canal. Al cumplirse este tiempo, el carro podrá moverse o cambiar de canal, según dependa el caso.
- Tiempo tratando cambio de canal: Variable interna de cada Conductor utilizada para registrar el tiempo transcurrido realizando dicha acción; en caso de ser mayor a 7 segundos de simulación, se procederá a abortar la misma.
- Velocidad preferida carro: Establece a cuál velocidad se desplazan los vehículos. Fue establecida como variable interna con un valor constante de 1 unidad de posición por cada segundo de la simulación.

4. 3. 2. 2. Variables dicotómicas

Solo pueden tomar valores “verdadero” o “falso”, siendo el segundo el que tienen establecido inicialmente. Otros agentes pueden utilizarlas para saber si el vehículo se encuentra girando en una esquina, cambiándose de canal de circulación o frenando. Para esto se cuenta con las siguientes ocho variables dicotómicas:

- Cancelar cambio de canal: En caso de que un vehículo no pueda cambiarse al otro carril de circulación, podrá detener esta secuencia de acciones para así tratar de realizar otras. Por medio de esta variable se impide que se vuelva a tratar de cambiar de canal y será restablecida como falsa al cambiar su dirección en las esquinas.
- Debes frenar: Otros agentes modifican esta variable en el carro que tienen atrás. De esta forma, los primeros pueden informarle a los otros cuando se encuentran detenidos y se complementa con la variable “¿Luz de freno?”.
- ¿Está en una esquina?: Permite que un Conductor informe a otros que se encuentra entrando en la redoma, o en alguna de sus esquinas, al tomar el valor “verdadero”.
- ¿Está dentro de la redoma?: Como su nombre lo indica, indica cuando el carro se encuentra adentro (o afuera) de la rotonda.
- ¿Luz de cruce derecha?: En las siguientes situaciones los vehículos activan la luz de cruce (se establece valor “verdadero”) para informar a otros el movimiento que se pretende realizar: En la entrada (o salida) de la rotonda o al cambiarse del carril 3 al carril 1.
- ¿Luz de cruce izquierda?: Los vehículos activan la luz de cruce al cambiarse del carril 1 al carril 3, para informar dicha intención a otros.
- ¿Luz de freno?: Cada vez que el agente deba frenar esta variable tendrá valor “verdadero”. De esta forma se imita el efecto que se produce en la realidad cuando se activa la luz de freno en cuanto el conductor pisa dicho pedal. Como fue explicado anteriormente, se complementa con la variable “Debes frenar”.
- ¿Pasó la salida?: Cuando un agente ha salido de la rotonda, o se encuentra en el sector donde se encuentra su salida pero no consigue alcanzarla (como ocurre cuando otro vehículo impide la maniobra), esta variable tendrá valor “verdadero” con el objeto de que no se continúe tratando de realizar dicha maniobra.

4. 3. 2. 3. Variables de entidades

Cuando un Conductor realiza una percepción de su entorno, el agente (o recurso) identificado es recordado por medio de este tipo de variables, con el objeto de posteriormente conocer el estado de alguna de sus variables externas. Para esto, se cuenta con las siguientes cuatro:

- Carril actual: Permite al carro seguir la ruta definida por las baldosas de circulación.
- Carril auxiliar: Establece la baldosa de destino cuando el carro se cambia de canal de circulación
- Carro al frente: Permite reconocer cuándo el carro que se encuentra al frente se encuentra muy próximo (o distante) y es necesario frenar, acelerar o cambiarse de canal de circulación.
- Carro atrás: Reconoce al agente que se encuentra inmediatamente detrás de cada vehículo, con el objeto de informarle cuándo se está frenando y es necesario que el otro agente tome las medidas necesarias para no colisionar.
- Carro cercano carril 1: Cada vez que el conductor observa a la derecha, bien sea por cambiarse del canal de circulación 3 al 1, para entrar a la redoma o salir de esta; el conductor debe observar en dicho sentido en busca de que no existan otras entidades que le impidan el movimiento.
- Carro cercano carril 3: Tiene las mismas características que la variable explicada anteriormente, con la diferencia de que es utilizada cuando el conductor desea observar a la izquierda; bien sea para cambiarse del canal de circulación 1 al 3 o para entrar a la rotonda.

4. 3. 2. 4. Variables de posición

Las variables de posición registran las coordenadas espaciales de los recursos o de los agentes. En este modelo solo se cuenta con la siguiente variable:

- Posición carro: Cada vez que un vehículo se desplaza esta variable es actualizada con el objeto de poder determinar la distancia entre lo que es observado y el agente, así como realizar otros cálculos.

4. 4. Razonamiento de los vehículos

El razonamiento de los agentes es la pieza clave de estos elementos, les permite interactuar con su entorno y tomar decisiones al respecto. De acuerdo a (SeSAm, 2011), todos los motores de razonamiento de este programa se encuentran constituidos por los siguientes elementos:

- Actividad de inicio: Representado por un círculo negro, marca el inicio de todos los elementos que permiten razonar a un agente. Cualquier regla puede comenzar en esta actividad pero nunca terminar.
- Actividad de estado: Constituido por los rectángulos de bordes redondeados, es donde se representan todas las acciones que puede realizar el agente.
- Actividad de finalización: Se encuentra representado por el círculo pequeño con una franja alrededor. Cuando una regla termina en esta actividad, se termina el razonamiento del agente y es borrado de la simulación, o se regresa al razonamiento principal en caso de que aplique.
- Actividad de emergencia: Simbolizados por el rectángulo con un relámpago, las reglas que comiencen en estas actividades son evaluadas en cada iteración de la simulación. Las reglas no pueden terminar en estas actividades.
- Reglas: Representado por flechas negras, comunican una actividad con otra y, en caso de que la condición evaluada sea correcta, permiten ejecutar la siguiente actividad.

A continuación, se muestra un motor de razonamiento básico. En el Anexo 2 podrá observarse el razonamiento utilizado por los vehículos en este modelo.

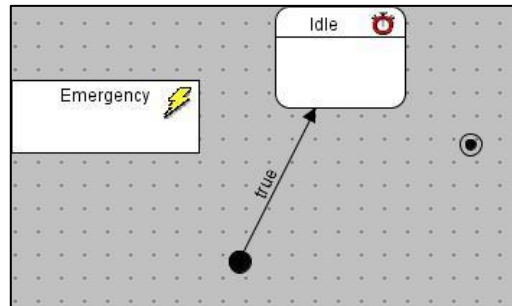


FIGURA 13.- MOTOR DE RAZONAMIENTO BÁSICO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

4. 4. 1. Inicio del motor de razonamiento

Al crearse un nuevo vehículo, el motor de razonamiento comienza en el círculo que representa la *Actividad de inicio*, como se explicó en el apartado anterior.

En este momento, es ubicado en el inicio de alguna de las tres entradas a la redoma, se establece cuál será la salida que deberá buscar el vehículo y se registra el tiempo del reloj de la simulación, con el objeto de registrar el momento en que el vehículo fue creado.

Para poder decidir sobre su entorno, el agente necesita conocer su posición, dirección, la baldosa de circulación en la que se encuentra y si existe algún otro vehículo en su entorno; realizando dos observaciones para reconocer estos últimos dos elementos.

4. 4. 2. Movimientos fuera de la redoma

Fuera de la redoma, un Conductor principalmente se desplaza en línea recta hasta llegar a la intercepción, momento en el que se detiene para ceder el paso de los vehículos que circulan por esta. Posteriormente, al salir de la redoma, avanzará hasta llegar al final del camino, momento en que desaparece de la simulación.

Para realizar esto cada entidad cuenta con siete actividades, las cuales son: Movimiento, frenar, acelerar, cambiarse de canal, entrar a la redoma, desaparecer.

4. 4. 2. 1. Actividad de *movimiento*

Permite el desplazamiento consecutivo del vehículo, siguiendo la ruta determinada por las baldosas de circulación y percibiendo cualquier otro conductor que se encuentre adelante, con un alcance de diez unidades para poder reconocer cuando otra entidad se encuentra detenida o se cambia de canal. Sin embargo, esta actividad no será ejecutada en caso de que el vehículo se encuentre detenido o adelante exista otro agente que se encuentre en el mismo canal de circulación (o entrando a este) en una distancia de siete unidades.

4. 4. 2. 2. Actividad de *frenar*.

En caso de percibir adelante otro agente que se encuentre detenido (o entrando al mismo canal de circulación) en una distancia menor a siete unidades, el Conductor podrá ejecutar esta actividad para evitar una colisión.

Además de detenerse, esta actividad contempla informarle al carro más próximo, que se encuentre detrás, que también debe frenar para así evitar colisiones. En una situación real, esta acción sería realizada por la luz de freno que se activa inmediatamente al pisar el pedal correspondiente.

4. 4. 2. 3. Actividad de *acelerar*

Una vez que el agente ha frenado, podrá volver a moverse una vez que el vehículo que se encontraba al frente deja de ser un obstáculo; ya sea porque este último logró entrar a la rotonda, cambiarse de canal de circulación, o simplemente porque pudo volver a desplazarse y se encuentra a una distancia mayor a siete unidades.

Además de reanudar su desplazamiento, también realiza una observación en busca de otros vehículos que puedan afectar su recorrido, como es el caso de alguno que justamente se encuentre cambiando de canal.

4. 4. 2. 4. Actividad de *cambiar de canal*

Siempre que el Conductor no se encuentre cerca de la intercepción de la redoma (ver FIGURA 4.- BALDOSAS DE CIRCULACIÓN MARCADAS COMO “IMPEDIR CAMBIO DE CANAL”) podrá cambiarse de canal para evadir algún carro que se encuentre detenido adelante en una distancia entre seis y diez unidades; como se explico anteriormente, se debe frenar en caso de que dicho carro se encuentre a menos de siete unidades. Cabe destacar que esta maniobra se realiza con el objeto de esquivar un obstáculo y no para lograr una mejor ubicación que facilite la entrada a la intersección.

Para realizar esta actividad, el Conductor debe observar que no exista otro elemento que le obstaculice la entrada al nuevo canal, ya sea porque este también pretender realizar la maniobra o porque simplemente se encuentra circulando muy próximo. En caso de existir alguno, deberá estar a una distancia mayor a 7 unidades para poder realizar el movimiento.

Además, debe determinarse la baldosa de circulación donde se encontrará luego de realizar el cambio de canal exitosamente, la cual además permite establecer la dirección que el Conductor debe tener.

A diferencia de las otras actividades, esta puede ser abortada en caso de alcanzar el área donde se prohíbe el cambio de canal o en caso de que el conductor tenga más de 7 segundos de simulación tratando de realizar la maniobra y haya encontrado algún impedimento. Dicha opción de abortar es comprobada en cada segundo de la simulación gracias a la “Actividad de emergencia”.

En la FIGURA 14 se observa un ejemplo del cambio de canal fuera de la redoma. En este caso el carro rojo se encuentra cambiándose del canal 3 al canal 1 debido a que el carro azul se encuentra cediendo el paso a otro carro dentro de la rotonda; es decir, el carro azul es un obstáculo porque se encuentra detenido. Debido a que no existe otro carro que impida la maniobra ni tampoco se está en la zona de prohibición de cambio de canal, el Conductor puede realizar dicho movimiento.

Al aproximarse a la intercepción con el anillo de circulación, los agentes se preparan para ceder el paso a aquellos que se encuentran dentro de la redoma.

En el caso de encontrarse en el carril 1, el Conductor solo deberá observar a los vehículos en el mismo carril pero dentro de la redoma, como se muestra a continuación en la FIGURA 15.

Por otro lado, los Conductores que se encuentran en el carril 3 deben preocuparse que no circulen otros carros en ambos carriles dentro de la redoma, como también se muestra a continuación en la FIGURA 15.

En ambos casos, de encontrarse algún vehículo que dificulte la entrada, se deberá frenar para ceder el paso a dichos elementos y podrá reiniciar su movimiento cuando el obstáculo observado se aleje seis unidades de la intercepción. Además, se busca algún carro que se encuentre detrás para informarle que también debe detenerse como fue explicado en la “Actividad de frenar”.

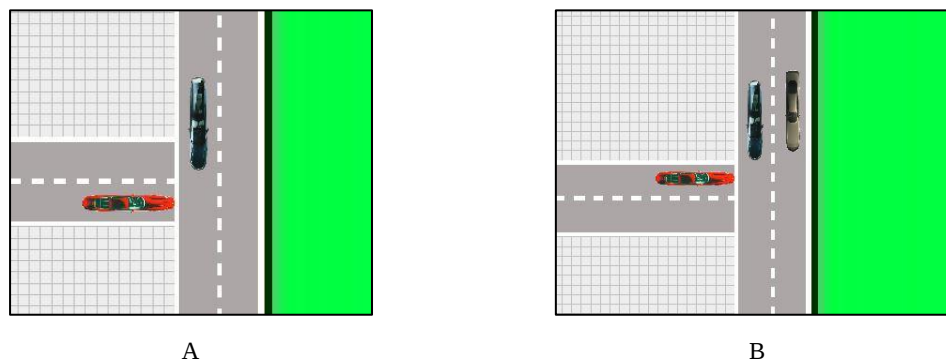


FIGURA 15.- ENTRADA A LA REDOMA
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

4. 4. 2. 6. Actividad de *desaparecer*

Una vez que el vehículo ha salido de la rotonda y alcanzado los límites del mapa, debe desaparecer debido a que es una simulación no toroide y, de otra forma, los carros solo se acumularían.

Justo antes de desaparecer el carro modifica las siguientes variables mundiales (descritas posteriormente en la sección 4. 5. 2. Variables globales):

- Se incrementan la variable “Carro saliendo”.
- Se disminuye la variable “Carro circulando”
- Se compara el tiempo de recorrido y en caso de ser el mayor se modifica la variable “Tiempo de recorrido máximo”, en caso de ser el menor se modifica “Tiempo de recorrido mínimo”. Igualmente se compara el número de vueltas

para así establecer las variables “Número máximo de vueltas en esquinas” y “Número mínimo de vueltas en esquinas”

- Se establece la sumatoria de todos los “Tiempo de recorrido” y de todos los “Número de vueltas en esquinas” de los carros que han salido de la simulación.

4. 4. 3. Movimientos dentro de la redoma

A diferencia de los movimientos fuera de la redoma, ahora los Conductores deben cambiar su dirección a medida que se desplazan, ubicarse en el carril 1 ó 3 dependiendo de lo próxima que se encuentre su salida, cambiarse de canal de ser necesario y observar en las intercepciones a los vehículos que se encuentran fuera de la redoma para evitar colisiones, esto último como una medida de capacidad de adaptación a pesar de tener prioridad de circulación.

Para realizar todo esto cada entidad cuenta con ocho actividades a realizar, las cuales son: Movimiento, frenar, acelerar, cambiarse de canal, girar en las esquinas, salida de la redoma e impedir entrada a la rotonda. Cerca de las intercepciones, los carros deben ser capaces de no confundir a los vehículos que se encuentran dentro de la redoma con los que no lo están.

4. 4. 3. 1 Actividad de *movimiento*

Al igual que la actividad fuera de la redoma, permite el desplazamiento de los vehículos siguiendo la ruta determinada por las baldosas de circulación y percibiendo cualquier otro conductor que se encuentre adelante. Esta actividad podrá realizarse siempre que el vehículo no se encuentre frenado o adelante exista otro agente que se encuentre en el mismo canal de circulación (o entrando a este), en una distancia de cinco unidades, incluso si este se encuentra girando en alguna esquina.

La diferencia de esta actividad radica en el hecho de que los Conductores que se encuentran cerca de una intercepción pueden percibir a los vehículos que se encuentran fuera de la rotonda, esto con el objeto de frenar para evitar colisiones.

4. 4. 3. 2. Actividad de *frenar*.

En caso de percibir otro vehículo adelante en una distancia menor a cinco unidades (que se encuentre detenido, cambiando de canal o entrando a la rotonda), el Conductor se detendrá para evitar una colisión.

Al igual que fuera de la redoma, esta actividad contempla informarle al carro más próximo que se encuentre detrás que también debe frenar.

4. 4. 3. 3. Actividad de *acelerar*

Detenido por completo, podrá reanudarse el movimiento una vez que el vehículo que se encuentre al frente deje de ser un obstáculo, ya sea porque: Pudo salir de la rotonda, cambiarse de canal de circulación, girar en una esquina o simplemente porque pudo volver a desplazarse y se encuentra a una distancia mayor a siete unidades. En caso de haber detectado otro vehículo atrás al frenar, se le informa que ya no debe frenar para que así pueda reactivar su movimiento.

Además de desplazarse, el Conductor también realiza una observación en busca de otros vehículos que puedan afectar su desplazamiento, como es el caso de alguno que se encuentre entrando al canal.

4. 4. 3. 4. Actividad de *cambiar de canal*

Siempre que el Conductor no se encuentre cerca de la intercepción de la redoma, o en las esquinas de la misma (ver FIGURA 4.- BALDOSAS DE CIRCULACIÓN MARCADAS COMO “IMPEDIR CAMBIO DE CANAL”), podrá cambiarse de canal con el objeto de:

- Poder evadir algún carro que se encuentre detenido adelante (entre seis y diez unidades de distancia). Como se explico anteriormente, se debe frenar en caso de que dicho carro se encuentre a menos de cinco unidades.
- Reactivar su movimiento luego de estar detenido durante siete segundos.
- Ubicarse en el canal 1 para salir de la rotonda o en el canal 3 para girar alrededor de esta en menor tiempo y facilitar el flujo vehicular. Es decir, lograr una mejor posición para maniobrar con mayor facilidad.

En situaciones reales, la maniobra de ubicarse en el canal interno del anillo de circulación permite, además, reducir los puntos de conflictos entre los vehículos y la complejidad (y frecuencia) de las decisiones que deben ser tomadas (Gobierno de España, 2013), (Gerencia Municipal de Urbanismo, 2000) y (Del Val, 2002).

El procedimiento para realizar la maniobra es muy parecido a cuando el vehículo se encuentra fuera de la rotonda, las principales diferencias radican en el hecho de que no deben confundirse a los vehículos que se encuentran dentro de la rotonda con los que no lo están y evaluar de no encontrarse en alguna zona de prohibición de la maniobra. Además, existen algunas condiciones especiales:

- No será realizado el cambio al canal interno del anillo de circulación cuando la salida que se busca se encuentra inmediatamente después del sector donde se ha entrado a la redoma, al menos que se encuentre un obstáculo al frente.
- Siempre que no se presente ningún obstáculo, será realizada la maniobra de cambio al canal externo del anillo de circulación cuando el Conductor se encuentre en el sector de redoma donde se encuentra la salida que busca.
- En caso de que un Conductor no pueda cambiarse al canal externo del anillo cuando se encuentre cerca de la salida, dejará de intentar realizar dicha

maniobra al menos que exista un obstáculo que le impida desplazarse en el canal interno del anillo de circulación. De esta forma, podrá realizar un giro completo a la redoma con mayor facilidad e intentar salir nuevamente.

Para realizar esta actividad, el Conductor debe observar que no exista otro carro que le obstaculice la entrada al nuevo canal, ya sea porque también pretende realizar la maniobra o porque simplemente se encuentra circulando muy próximo. En caso de existir alguno, deberá estar a una distancia mayor a 7 unidades.

Además, debe determinarse la baldosa de circulación donde se encontrará luego de realizar el cambio de canal exitosamente, la cual además permite establecer la dirección que el vehículo debe adoptar.

Igualmente, esta actividad puede ser abortada en caso de alcanzar el área donde se prohíbe el cambio de canal o en caso de que el conductor tenga más de 7 segundos de simulación tratando de realizarla y haya encontrado algún impedimento.

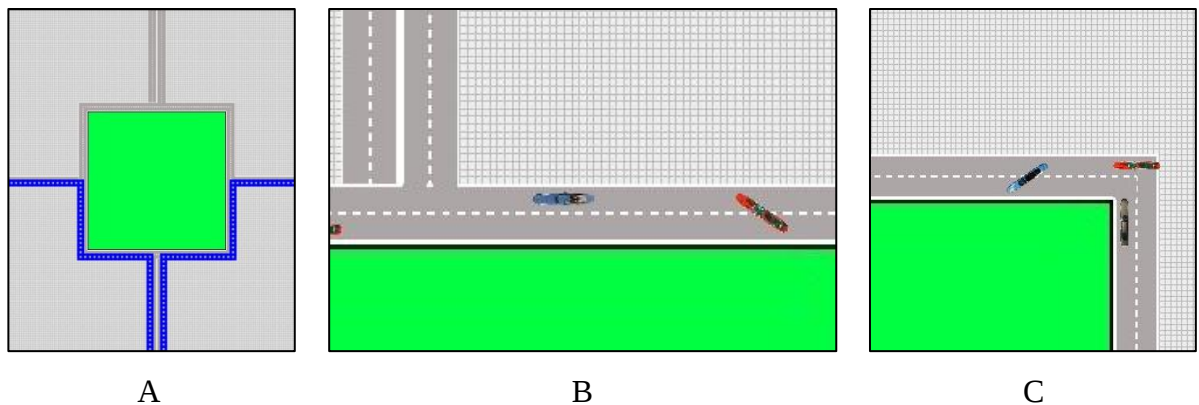


FIGURA 16.- CAMBIOS DE CANAL DENTRO DE REDOMA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En la FIGURA 14 son observados tres casos de cambio de canal. En primer caso, señala la situación anteriormente explicada donde no es necesario entrar al canal interno del anillo de circulación debido a que la salida que se busca se encuentra inmediatamente después de la entrada a la rotonda. Como se muestra, solamente en dos situaciones se presenta este caso.

El segundo caso muestra un vehículo ubicándose en el canal externo de circulación (canal 1) para así poder salir de la rotonda. Por último, el Conductor se ubica en el canal interno (canal 3) para realizar el recorrido con mayor facilidad.

4. 4. 3. 5. Actividad de *giro en las esquinas*

Una vez alcanzada la zona de prohibición de cambio de canal próxima a una esquina (ver FIGURA 4.- BALDOSAS DE CIRCULACIÓN MARCADAS COMO “IMPEDIR CAMBIO DE CANAL”), el Conductor se prepara para realizar la maniobra. Para esto, observa la baldosa de circulación donde debe realizar el giro y que no exista algún otro vehículo que impida la maniobra, deberá frenar de encontrarse alguno en un rango de siete unidades. Hecho esto, avanzará hasta dicha baldosa y procederá a girar para posteriormente continuar con su camino.

4. 4. 3. 6. Actividad de *impedir entrada a la redoma*

Como medida de garantizar la prioridad de circulación ante los vehículos que están fuera de la rotonda, esta actividad se encarga de percibirlos y obligarlos a frenar en caso de que se encuentren a una distancia menor de cinco unidades.

A pesar de ser una actividad necesaria para el funcionamiento del modelo, en la vida real su equivalente más próximo podría ser la advertencia de proximidad que realizan los Conductores al activar y desactivar, repetidamente, las luces altas de sus vehículos o hacer sonar la corneta repetidamente al observar a otro carro entrar en la redoma cuando existe poco espacio de separación entre ellos.

4. 4. 3. 7. Actividad de *salida de la redoma*

El Conductor se prepara para salir de la rotonda una vez que identifican que se encuentra en el sector donde se encuentra la salida buscada. Ante esto pueden ocurrir dos cosas:

- Si el carro se encuentra en el canal externo del anillo de circulación (carril 1), podrá salir fácilmente de la rotonda al alcanzar la baldosa identificada para permitir dicho movimiento
- Si el carro se encuentra en el canal interno del anillo de circulación (carril 3), deberá primero cambiarse de canal para realizar la maniobra. En caso de no lograrlo y pasar la salida deseada, deberá volver a dar toda la vuelta a la rotonda pero se mantendrá en el carril 3 hasta volver a alcanzar el sector de la rotonda donde se encuentra la salida.

Una vez ubicado en el carril 1, será realizada la maniobra al observar la baldosa de circulación identificada con el mismo número de salida que el vehículo se encuentra buscando.

Al salir de la rotonda, los Conductores registran su variable “¿Pasó la salida?” como verdadero, con el objeto de evitar confusiones entre los vehículos que ya salieron de la redoma con los que aún no han entrado a esta.

4. 5. Características del mundo

Para el programa SeSAm, el mundo es un agente pero, a diferencia de los agentes “Conductor”, controla variables globales de la simulación. Identificado con el nombre “Mundo de carros”, tiene como funciones la creación de los vehículos y el registro las variables respuestas del modelo.

La creación de los vehículos es realizada en los extremos de cada vía de entrada, específicamente en los lugares de las baldosas de circulación resaltadas a continuación.

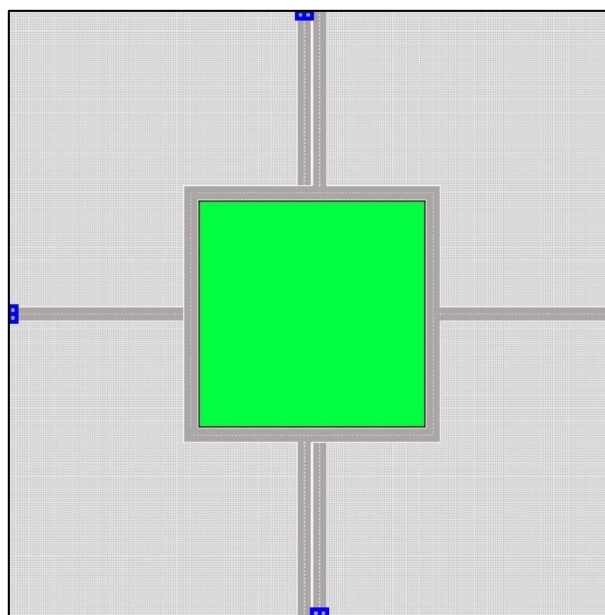


FIGURA 17.- ENTRADA DE LOS VEHÍCULOS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Dichas entradas corresponden a las siguientes coordenadas del mapa de simulación:

TABLA 1.- COORDENADAS ESPACIALES DE LAS ENTRADAS

Entrada	Carril 1	Carril 3
Entrada número 1 (lado superior de rotonda)	(71 ; 1)	(73 ; 1)
Entrada número 2 (lado izquierdo de rotonda)	(1 ; 75)	(1 ; 73)
Entrada número 3 (lado inferior de rotonda)	(77 ; 147)	(75 ; 147)

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

4. 5. 1. Creación de los vehículos.

La creación de los vehículos corresponde con la densidad de carros que entran a la redoma y el momento en que lo hacen; por lo tanto, es preciso controlar estas variables para así establecer los distintos escenarios de desempeño del modelo. Para esto, la actividad de inicio del razonamiento del “Mundo de carros” es conectado con la actividad “Flujo de vehículos”, como se muestra en la siguiente figura.

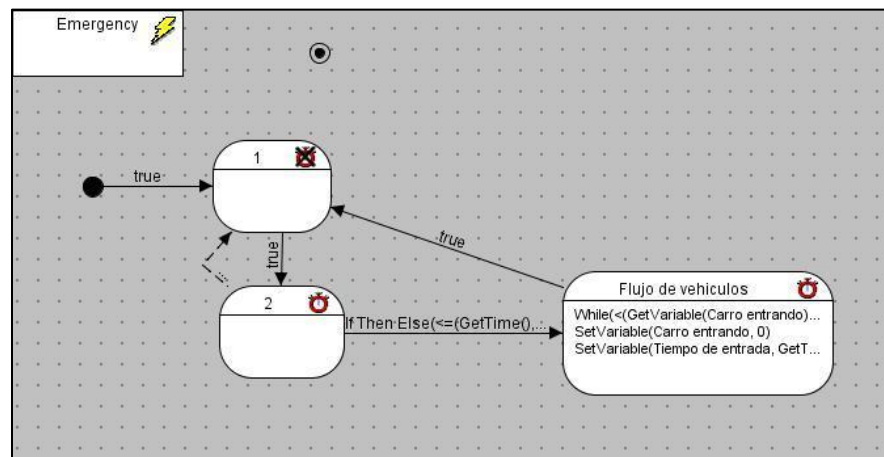


FIGURA 18.- MOTOR DE RAZONAMIENTO DE “MUNDO DE CARROS”
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En esta actividad, se trabaja con las variables “Densidad de carros”, “Carro entrando” y “Tiempo de entrada”, las cuales son utilizadas solamente por el “Mundo de carros”. La primera permite establecer el nivel de densidad del escenario que pretende evaluarse, la segunda cuenta la cantidad de carros que son creados en un instante (valor que aumentará hasta ser igual al de la primera variable mencionada) y la tercera indica el instante de la simulación en que se permite crear los vehículos.

Llegado el momento de crear un nuevo vehículo, se establece la entrada en la cuál será creado utilizando la variable “Entrada aleatoria”, las tres tienen igual probabilidad de ser escogidas. Dependiendo de este valor, son creados en cada entrada con igual probabilidad de estar en cualquiera de los dos canales circulación, siempre que no exista otro agente que lo impida.

Seleccionada la entrada y el carril, el vehículo será creado en alguna de las coordenadas indicadas anteriormente en la TABLA 1.- COORDENADAS ESPACIALES DE LAS ENTRADAS. Una vez creado, son establecidos su dirección espacial, el canal de circulación y la entrada donde se encuentra. Por último, se incrementan los valores de las variables globales “Carros circulando”, “Carro entrando” y “Total carros creados”.

4. 5. 2. Variables globales

El “Mundo de carros” maneja catorce variables de tipo numéricas que permiten tener información sobre la cantidad de vehículos en el modelo y sus tiempos en el sistema. Estas son:

- Carro entrando: Permite contar cuantos están entrando en una iteración hasta alcanzar el nivel establecido por la variable “Densidad de carros”.
- Densidad de carros: Permite establecer la cantidad de vehículos que puede ser creados en total, durante una iteración, en todas las entradas.
- Entrada aleatoria: Es una variable interna la cual establece en cuál de las tres entradas podrá ser creada la nueva entidad. Cada una posee igual probabilidad de ser escogida.
- Número de carros circulando: Registra la cantidad que se encuentran circulando en el mapa. Aumenta cuando un automóvil es creado y disminuye cuando uno sale del mapa de la simulación.
- Número de carros saliendo: Registra la cantidad de vehículos que logran completar el recorrido efectivamente y salir del mapa de la simulación.
- Número máximo de vueltas en esquinas: Registra la cantidad máxima de veces que un carro tuvo que girar en las esquinas de la rotonda. Cuatro vueltas equivalen a una vuelta completa alrededor de la intercepción.
- Número mínimo de vueltas en esquinas: Registra la cantidad mínima de veces que un carro tuvo que girar en las esquinas de la rotonda.

- Sumatoria de número de vueltas en esquina: Cuenta la cantidad total de giros que cada Conductor tuvo que realizar para poder salir de la rotonda.
- Sumatoria de tiempo de recorrido: Cuenta el tiempo total que cada Conductor demoró en realizar todo el recorrido hasta desaparecer del mapa de simulación.
- Tiempo de entrada: Permite determinar en cuál segundo de simulación se puede realizar la actividad de entrada de vehículos al establecer la diferencia entre el tiempo de reloj de simulación y el valor de esta variable.
- Tiempo de recorrido máximo: Registra el tiempo máximo que un carro demoró en realizar todo el recorrido hasta desaparecer del mapa de simulación.
- Tiempo de recorrido mínimo: Registra el tiempo mínimo que un carro demoró en realizar todo el recorrido hasta desaparecer del mapa de simulación.
- Total carros creados: Cuenta la cantidad de vehículos que han sido creados efectivamente durante la simulación.

4. 6. Variable respuesta del modelo

Al completar el recorrido, nos interesará conocer el tiempo de recorrido de cada Conductor, al igual que en el trabajo realizado por (Robles Hurtado, 2012), y la cantidad de vueltas que realizó alrededor de la redoma para salir de esta.

Al crearse un nuevo “Conductor” en el extremo de alguna entrada, se registra el tiempo del reloj de la simulación en la variable externa del mismo llamada “Tiempo de recorrido”. Posteriormente, cuando la entidad se dispone a desaparecer del mapa, se calcula la diferencia entre el tiempo del reloj de la simulación en ese momento y el valor que había sido almacenado anteriormente, de esta forma se determina el tiempo total de recorrido y permite registrar el tiempo de recorrido mínimo, promedio y máximo.

Además, a medida que el vehículo circula por el anillo de circulación, se registra la cantidad de esquinas en las que gira para determinar la cantidad de vueltas que realizó alrededor de la redoma para poder salir. Con este valor se determina la cantidad de vueltas máxima, promedio y mínima.

4. 7. Validación del modelo

Debido a que para el presente trabajo no se tienen datos históricos, la validación se realizó verificando el correcto funcionamiento del modelo y el cumplimiento de las normas establecidas. A continuación se presenta una lista de algunos de los procesos verificados:

- ✓ Los vehículos son creados con igual probabilidad por el mundo, en cualquiera de las tres entradas y en cualquiera de los dos carriles.
- ✓ Se mueven a una velocidad de una unidad por cada segundo de simulación.
- ✓ A medida que se desplazan, reconocen los carros en su entorno y la ruta determinada por las baldosas de circulación.
- ✓ Los carros mantienen una distancia prudencial entre ellos.
- ✓ Son capaces de reconocer las esquinas y girar en cada una de ellas.
- ✓ Pueden frenar por completo cuando el vehículo que tienen al frente se encuentra a una distancia menor que cinco unidades.
- ✓ Una vez que el carro de adelante se encuentra a más de siete unidades de distancia, el vehículo es capaz de acelerar.
- ✓ Son capaces de reconocer las entradas en las redomas, donde deben detenerse y ceder el paso a los carros que se encuentran a menos de diez unidades de distancia. También son capaces de reconocer el momento en que entran a la redoma y deben girar para incorporarse al flujo de vehículos.
- ✓ Cuando la salida que deben tomar no es la próxima, son capaces de cambiarse al canal interno de la rotonda para realizar el recorrido con mayor facilidad y

permitir mayor fluidez para aquellos vehículos que deseen salir, siempre que no se encuentre otro carro que le impida la maniobra.

- ✓ Pueden cambiarse de canal cuando el carro que tienen adelante se encuentre detenido y a una distancia menor de diez unidades.
- ✓ Reconocen el lado de la redoma donde se encuentra la salida que deben tomar y son capaces de cambiarse al canal externo para poder tomar la salida, siempre que no se encuentre otro carro que le impida la maniobra.
- ✓ Identifican el lugar donde se encuentra la salida, así como realizar la maniobra para salir de la redoma.
- ✓ Luego de salir de la rotonda y llegar al final del mapa, los carros desaparecen para realizar la representación de haber salido del área de estudio.

CAPÍTULO 5. DISEÑO Y RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS DEL MODELO

El modelo basado en agentes del presente trabajo fue evaluado en tres escenarios con el fin de conocer el tiempo de recorrido de los vehículos, desde que son creados hasta que desaparecen en los extremos del mapa de simulación, y la cantidad de vueltas necesarias para salir de la rotonda. Además, en este capítulo se encuentra la verificación estadística de los resultados obtenidos en cada escenario.

5. 1. Descripción general

En cada escenario, los vehículos deben ser creados en el mapa en los inicios de cada entrada a la redoma, avanzar hasta entrar a esta, realizar el recorrido alrededor de la intersección, salir de la misma y, por último, continuar la ruta hasta llegar al final de la vía, momento en el cual los vehículos desaparecen.

La tasa de llegada de vehículos será variada en cada escenario pero cada corrida de simulación tendrá la duración de una hora. En todo caso, será evaluado el tiempo de recorrido de cada individuo y el número de vueltas realizadas alrededor de la rotonda; para esto último, serán contadas las veces que un carro gira en cada esquina de la redoma, es decir, cuatro giros representa una vuelta completa.

5. 1. 1. Escenario uno

Considerado escenario base de comparación, son analizados los tiempos máximos y mínimos que puede tardar un vehículo en realizar el recorrido.

El recorrido mínimo corresponde a la ruta más corta que pueda realizarse; es decir, cuando un vehículo es creado en la entrada 2 ó 3, la salida que busca tiene los mismos valores que su entrada, siempre se muevan por el carril 1 y solo deben girar en una esquina de la rotonda, como se resume a continuación.

TABLA 2.- RUTAS MÁS CORTAS

Ruta	Entrada	Salida	Canal de circulación	Número de giros en rotonda
A	2	2	1	1
B	3	3	1	1

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Estas rutas solo recorren un cuarto de la redoma y son mostradas a continuación.

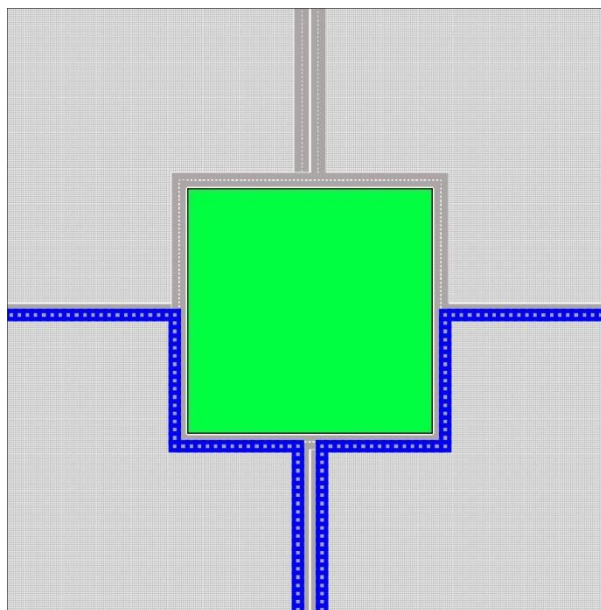


FIGURA 19.- RUTA MÁS CORTA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Cada una de estas rutas cortas se encuentra constituida por 72 baldosas de circulación, cuya forma es cuadrada y de 2 unidades de longitud (ver sección 4. 2. 1. Baldosas de circulación). Esto implica que cada ruta mide una longitud de 144 unidades.

Para una muestra de diez recorridos, se obtuvo el siguiente tiempo de recorrido.

TABLA 3.- TIEMPO DE RECORRIDO DE RUTA MÁS CORTA

Tiempo de recorrido promedio (segundos iterados)	Desviación estándar del tiempo (segundos iterados)	Coefficiente de variación (%)	Número de giros a rotonda
137,9	2,1	1,52	1

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

De igual forma, el recorrido máximo corresponde a la ruta más larga que pueda realizarse; es decir, cuando un vehículo es creado en la entrada 1 ó 3, la salida que busca tiene valor 1 ó 2 (respectivamente) y siempre se mueve por el carril 3, tal como se resume a continuación.

TABLA 4.- RUTAS MÁS LARGAS

Ruta	Entrada	Salida	Canal de circulación	Número de giros en rotonda
A	1	1	3	4
B	3	2	3	4

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Estas rutas dan una vuelta completa a la redoma (es decir, cuatro giros) y realizan dos cambios de canal, primero con el objeto de entrar al canal interno del anillo de circulación y luego con el objeto de cambiarse al canal externo para salir de la rotonda. Las mismas son mostradas en la siguiente figura.

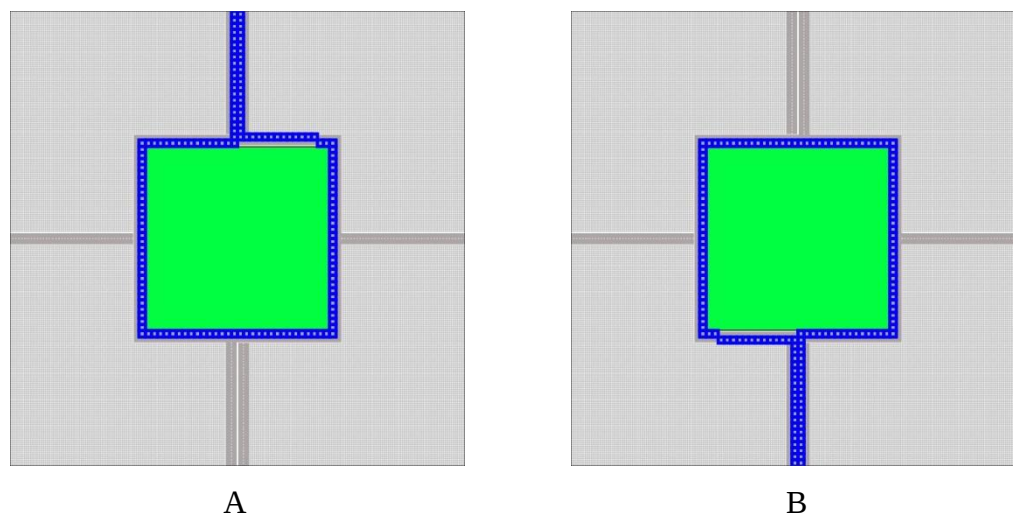


FIGURA 20.- RUTA MÁS LARGA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Cada una se encuentra constituida por 165 baldosas de circulación, lo que implica que cada ruta mide una longitud de 330 unidades. Sin embargo, en este caso se agrega el movimiento de cambiarse de canal de circulación para salir de la rotonda el cual no es necesario en el caso de la ruta más corta.

Los valores obtenidos para una muestra de diez recorridos son mostrados a continuación:

TABLA 5.- TIEMPO DE RECORRIDO DE RUTA MÁS LARGA

Tiempo de recorrido promedio (segundos iterados)	Desviación estándar del tiempo (segundos iterados)	Coefficiente de variación (%)	Número de giros a rotonda
321,95	1,65	0,513	4

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5. 1. 2. Escenario dos

Para este escenario fue establecida una tasa de llegada de 1 carro por cada 27 segundos de simulación. Para una muestra de vehículos de tamaño 3936, obtenida tras 30 corridas de simulación, los tiempos de recorridos (máximos, promedios y mínimos) y la cantidad de vueltas a la redoma se presentan a continuación.

TABLA 6.- TIEMPO DE RECORRIDO ESCENARIO 2

Tiempo de recorrido promedio (segundos iterados)	Desviación estándar del tiempo (segundos iterados)	Coeficiente de variación (%)	Tiempo máximo (segundos iterados)	Tiempo mínimo (segundos iterados)
264,51	126,15	47,69	1320,00	135,00

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 7.- CANTIDAD DE VUELTAS ESCENARIO 2

Nº de giros promedio	Nº máximo de giros	Nº mínimo de giros
3,0	20,0	1,0

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Con el objeto de comprobar si el conjunto de datos se ajustan a alguna distribución de probabilidad conocida, se realizaron pruebas de la bondad del ajuste en las cuales se manejan dos hipótesis:

H_0 : Los datos se ajustan a una distribución de probabilidad teórica: $F(x) = F_0(x)$

H_1 : Los datos no se ajustan a una distribución teórica: $F(x) \neq F_0(x)$

De acuerdo a esto, con un nivel de significación del 1%, se obtuvo que la distribución muestral de los datos puede aproximarse a una distribución exponencial de expresión:

$$\text{Ecuación 8:} \quad \text{Distribución} \sim 135 + \text{Expo}(130)$$

De acuerdo a la prueba Kolmogorov-Smirnov de la bondad del ajuste de una muestra, con esta distribución se obtiene un Pvalor inferior a 0,01, como se muestra a continuación.

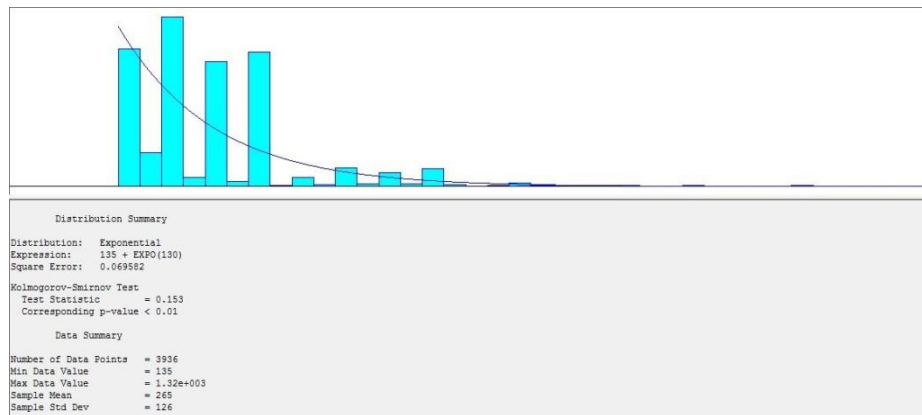


FIGURA 21.- DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE RECORRIDO ESCENARIO 2.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Considerando un nivel de significación del 1%, fue determinado el ancho medio del intervalo de confianza del tiempo promedio de recorrido utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 9:

$$h = t_{n-1; 1-\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Donde:

h: Intervalo de confianza.

S: Desviación estándar.

n: Tamaño de muestra.

α : Nivel de significación.

t: Distribución t de Student.

De acuerdo a la Ecuación 9: y a la TABLA 6, se obtiene un ancho medio de 5,18 segundos del intervalo de confianza centrado en el valor 264,51segundos.

De igual forma, fue determinada la distribución que sigue el número de vueltas que realizan los vehículos. La misma presenta la siguiente forma:

Ecuación 10: Distribución $\sim 0,5 + \text{Erlang}(1,26 ; 2)$

De acuerdo a la prueba chi-cuadrado de la bondad del ajuste, con esta distribución se obtiene un Pvalor $< 0,005$. Como se muestra a continuación:

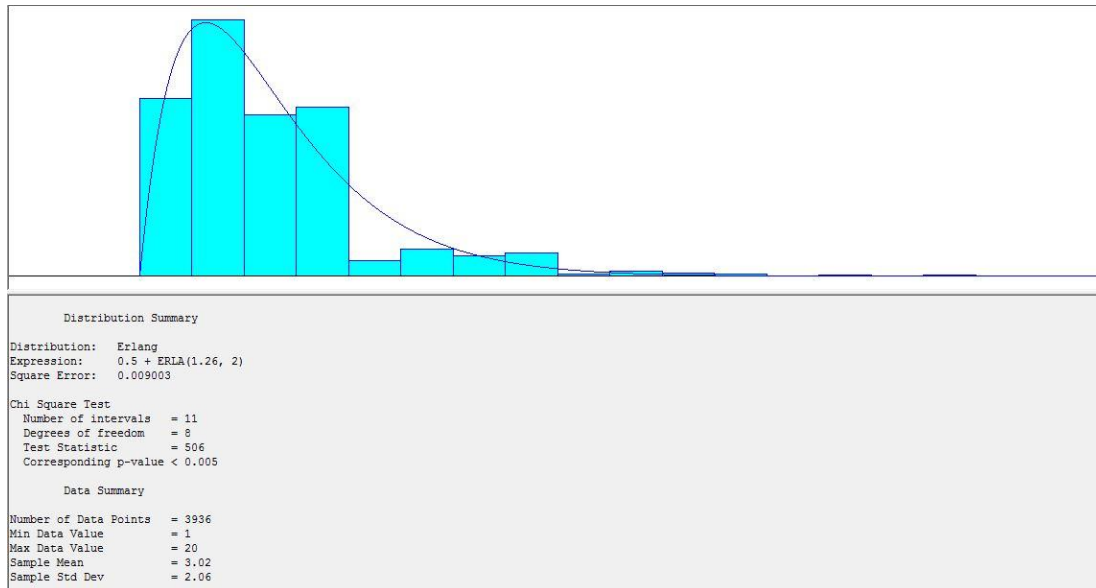


FIGURA 22.- DISTRIBUCIÓN DEL NÚMERO DE VUELTAS ESCENARIO 2.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5. 1. 3. Escenario tres

En este caso fue establecida una tasa de llegada de 1 carro por cada 17 segundos de simulación, aumentando de esta forma la frecuencia de entrada. Los tiempos de recorridos máximos, promedios y mínimos, y la cantidad de vueltas a la redoma se presentan a continuación para una muestra de vehículos de tamaño 8127, obtenida tras 40 corridas de simulación.

TABLA 8.- TIEMPO DE RECORRIDO ESCENARIO 3

Tiempo de recorrido promedio (segundos iterados)	Desviación estándar del tiempo (segundos iterados)	Coeficiente de variación (%)	Tiempo máximo (segundos iterados)	Tiempo mínimo (segundos iterados)
292,76	182,69	62,40	2789,00	135,00

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 9.- CANTIDAD DE VUELTAS ESCENARIO 3

Nº de giros promedio	Nº máximo de giros	Nº mínimo de giros
3,4	44	1

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Al igual que en el escenario 2, fue realizada la siguiente prueba de hipótesis con el fin de determinar la bondad del ajuste de los datos obtenidos.

H_0 : Los datos se ajustan a una distribución de probabilidad teórica: $F(x) = F_0(x)$

H_1 : Los datos no se ajustan a una distribución teórica: $F(x) \neq F_0(x)$

Con un nivel de significación del 1%, los valores muestrales del tiempo de recorrido se aproximan a una distribución exponencial de expresión:

Ecuación 11: Distribución $\sim 135 + \text{Expo}(158)$

De acuerdo a la prueba Kolmogorov-Smirnov de la bondad del ajuste de una muestra, con esta distribución se obtiene un Pvalor $< 0,01$, como se muestra a continuación.

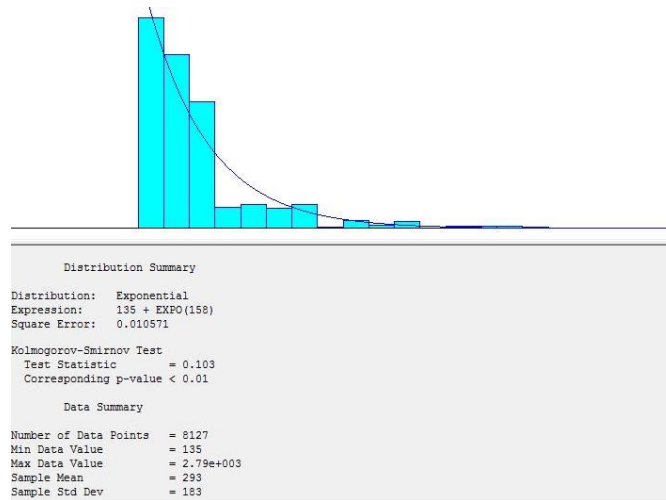


FIGURA 23.- DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE RECORRIDO ESCENARIO 3.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Considerando un nivel de significación del 1%, fue determinado el ancho medio del intervalo de confianza del tiempo promedio de recorrido utilizando la Ecuación 9:. De esta manera, se obtuvo un ancho medio de 5,22 segundos centrado en el valor 292,76 segundos, como lo indica la TABLA 8.

De igual forma, fue determinada la distribución que sigue el número de vueltas que realizan los vehículos. La misma presenta la siguiente forma:

$$\text{Ecuación 12} \quad \text{Distribución} \sim 0,5 + \text{Lognormal}(2,94 ; 3,24)$$

De acuerdo a la prueba chi-cuadrado de la bondad del ajuste, con esta distribución se obtiene un Pvalor < 0,005. Como se muestra a continuación:

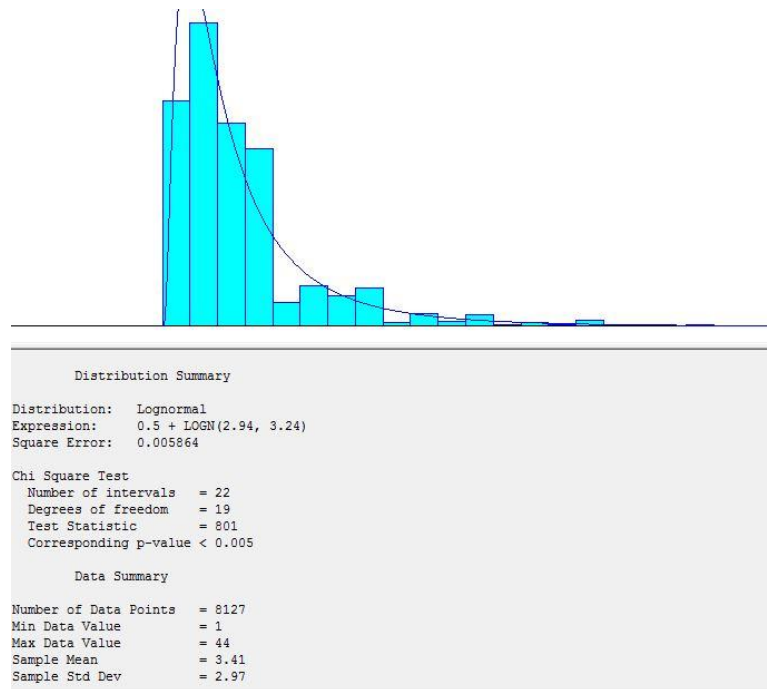


FIGURA 24.- DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE RECORRIDO ESCENARIO 3.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5. 1. 4. Comparación de escenarios

Los escenarios 2 y 3 fueron comparados con el objeto de constatar que existan diferencias significativas entre los dos grupos de muestra. Para esto, fue establecida la siguiente prueba de hipótesis.

H_0 : Los promedios muestrales obtenidos son iguales: $\mu_2 = \mu_3$

H_1 : Los promedios muestrales obtenidos son distintos: $\mu_2 \neq \mu_3$

Considerando un nivel de significación del 1%, de la prueba se obtuvo un Pvalor igual a 0,000; es decir, un resultado mucho menor que 1%.

Los valores de los tiempos y del número de vueltas obtenidos para ambos escenarios se resumen a continuación.

TABLA 10.- RESUMEN DE TIEMPOS DE RECORRIDOS

Escenario	Tiempo de recorrido promedio (segundos iterados)	Intervalo medio de confianza (segundos iterados)	Distribución	Prueba Kolmogorov-Smirnov
2	264,51	5,18	135 + Expo(130)	Pvalor < 0,01
3	292,76	5,22	135 + Expo(158)	Pvalor < 0,01

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 11.- RESUMEN DE VUELTAS REALIZADAS

Escenario	Nº de giros promedio	Nº máximo de giros	Distribución	Prueba chi-cuadrado
2	3,0	20,0	0,5 + Erlang(1,26 ; 2)	Pvalor < 0,005
3	3,4	44	0,5 + Lognormal(2,94 ; 3,24)	Pvalor < 0,005

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se procedió a analizar los resultados obtenidos en los escenarios dos y tres del modelo de simulación, utilizando como referencia el escenario uno, así como la verificación estadística de los mismos.

6. 1. Análisis de resultados

Los resultados del primer escenario, de los tiempos máximos y mínimos, muestran que existe cierta aleatoriedad en los vehículos a pesar que, en ambos casos, solo se desplazaba un carro por cada ruta (ver TABLA 3 y TABLA 5). Lo que indica que cada Conductor puede tomar decisiones distintas incluso cuando se encuentra en situaciones semejantes, esto se debe al motor de razonamiento con el que cuentan.

En los escenarios dos y tres, se observa un tiempo mínimo de recorrido igual a 135 segundos (ver TABLA 6 y TABLA 8) que resulta ser menor que el valor promedio obtenido del tiempo mínimo del escenario 1.

Se observa que los tiempos máximos obtenidos en los escenarios dos y tres son mayores que el tiempo máximo promedio en el escenario 1. Esto se debe a que, en varias situaciones, algunos vehículos no pudieron salir de la rotonda rápidamente por lo que tuvieron que dar, por lo menos, una vuelta completa a la rotonda para volver a intentar. Incluso se observa un máximo de 11 vueltas completas a la rotonda (igual a 44 giros en esquinas observados en la TABLA 9.- CANTIDAD DE VUELTAS ESCENARIO 3).

Como señalan (Gilbert & Troitzsch, 2005), (Álvarez & Soto, 2008) y (Klügl, Oechslein, Puppe, & Dornhaus, 2004), se observa un comportamiento que emerge cuando interaccionan las entidades. En cada entrada de la rotonda se observa que los carriles 1 tienen un mayor flujo vehicular en comparación con el carril 3 debido a que, en el último caso, deben realizarse una mayor cantidad de decisiones para evitar colisiones con los vehículos que se encuentran desplazando dentro de la intercepción en ambos anillos de circulación; mientras que aquellos que entran por el carril 1 solo

deben preocuparse por los obstáculos del anillo externo de circulación, como fue mostrado en la FIGURA 15.- ENTRADA A LA REDOMA.

Además, se observa que los agentes tienden a aglomerarse en los sectores 2 y 3 de la rotonda (lado inferior y derecho, respectivamente) debido a la cantidad de entidades que han entrado a la intercepción y aún no han alcanzado su salida. Esto ocasiona que se dificulten las maniobras de cambio de canal y salida de la rotonda, lo que ocasiona que muchos vehículos tengan que volver a dar una vuelta a la rotonda para volver a intentar salir de la misma. El efecto se destaca cuando se entra en el sector 2 y disminuye cuando se pasa el sector 3; sin embargo, los carros que no han podido salir se mantienen aglomerados al volver a realizar un giro a la rotonda.

Al aumentar la frecuencia de entrada de vehículos aumenta la cantidad máxima de vueltas completas que un carro puede realizar entorno al islote central debido la mayor cantidad de conductores y sus influencias sobre los otros al impedir la salida de la intercepción (ver TABLA 11). Esto además ocasiona que la rotonda tienda a saturarse debido al exceso de agentes que por ella circulan.

En las pruebas de la bondad del se evaluaron las siguientes hipótesis:

H_0 : Los datos se ajustan a una distribución de probabilidad conocida: $F(x) = F_0(x)$

H_1 : Los datos no se ajustan a una distribución conocida: $F(x) \neq F_0(x)$

De acuerdo a (Fernández Loureiro & García, 2007), para rechazar la hipótesis nula el valor del nivel de significación preestablecido por el investigador debe ser mayor que el Pvalor suministrado por la prueba.

Tras evaluar distintas distribuciones, y considerando un valor de nivel de significación igual al 1%, fue obtenido que los datos muestrales de los escenarios 2 y 3 si se ajustan a la curva exponencial, debido a que se obtuvieron como resultado en ambos casos que Pvalor es menor a 1% (ver TABLA 10.- RESUMEN DE TIEMPOS DE RECORRIDOS). Por lo tanto, no existen evidencias suficientes que indiquen que los tiempos de recorridos de cada conductor no se encuentran distribuidos de manera exponencial.

El parámetro de la distribución de datos exponencial es asociado con el tiempo promedio que existe entre que sucede un evento y el siguiente (Canavos, 1988), en este caso entre la salida de un vehículo del sistema y el próximo. Por lo tanto, es correcto esperar obtener esta distribución a partir de los valores obtenidos.

Igualmente, tras realizar la prueba de bondad de ajuste con distintas distribuciones, fue encontrado que la cantidad total de vueltas que un conductor debe realizar alrededor de la rotonda presenta el menor error de aproximación al compararla con la distribución Erlang y con la distribución logarítmica normal, en los escenarios 2 y 3 respectivamente.

Sin embargo, a pesar de haber sido las distribuciones que mejor se ajustan a los datos, con un nivel de significación del 1%, no existen evidencias suficientes que indiquen que el número de giros a la rotonda que un conductor debe realizar se encuentre distribuido de acuerdo alguna de las funciones señaladas; debido a que, en ambos escenarios, fueron obtenidos como resultados un Pvalor menor que 0,5% (ver TABLA 11.- RESUMEN DE VUELTAS REALIZADAS).

Al aumentar la frecuencia de entrada de vehículos al sistema, y por lo tanto la cantidad de elementos circulando, se obtiene un aumento en el tiempo promedio de recorrido así como de la cantidad total de vueltas que pueden realizarse alrededor de la rotonda debido a que otros conductores obstaculizan la salida.

Al realizar una comparación de promedios muestrales de ambos escenarios, fue determinado que existen diferencias significativas entre ellos; es decir, al cambiar la tasa de frecuencia de llegada de vehículos si se obtuvieron escenarios completamente distintos.

Esto pudo determinarse al realizarse una prueba de hipótesis de comparación de promedios donde el resultado obtenido del Pvalor es igual a 0,000; es decir, mucho menor que 1%. Por lo tanto, considerando un nivel de significación del 1%, no existen evidencias suficientes que indiquen que los promedios muestrales obtenidos sean iguales.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del estudio realizado se puntualizan las siguientes conclusiones y recomendaciones.

7. 1. Conclusiones

- Se generó un modelo de simulación representativo de tráfico, basado en agentes, de una rotonda cuadrada compuesta por tres entradas y tres salidas donde los vehículos que circulan tienen como medidas de ancho y largo de 1,743 y 4,337 unidades, respectivamente.
- Los agentes son creados en los extremos del mapa de simulación, se desplazan hasta llegar a la intersección con la rotonda, entran en la intersección, siguen el recorrido del anillo de circulación hasta alcanzar la salida que buscan, salen de la intersección y se desplazan hasta el otro extremo del mapa de simulación donde desaparecen. Además, son capaces de ceder el paso al momento de entrar en la intersección, frenar, acelerar y reconocer otros vehículos vecinos que puedan afectar su movimiento y cambiarse de canal de circulación con el objeto de evadir otros conductores o de tener una mejor posición al recorrer el anillo de circulación.
- Se analizaron y compararon los resultados obtenidos de cada escenario obteniendo que emerge un comportamiento cuando los agentes interactúan entre ellos debido a las distintas acciones que pueden realizar. Se observa que, en cualquiera de las tres entradas, se presenta un mayor flujo vehicular en el carril 1 (que se comunica con el anillo externo de la rotonda) en comparación con el carril 3 (que se comunica con el anillo interno); en este último, los agentes deben tomar una mayor cantidad de decisiones para evitar colisiones contra los agentes que se encuentren en el carril interno y externo. Por otro lado, ya dentro de la rotonda, se observa una mayor aglomeración de vehículos entre los sectores 2 y 3 (zona inferior y derecha de la rotonda) que dificulta las maniobras de cambio de canal y salida de los

agentes de la rotonda; pasada la salida 3 (ubicada a la derecha de la rotonda) disminuye este efecto y se facilita el movimiento de cambio de canal de los vehículos.

- Al aumentar el número de agentes que circulan por el sistema, aumenta el tiempo que tardan en completar el recorrido y la cantidad de vueltas máximas que pueden realizarse debido a que los agentes pueden obstaculizar el movimiento de los otros, incluso impidiéndoles la salida de la intercepción.
- Entre los escenarios evaluados, se establece el escenario dos (de menor frecuencia de creación de vehículos) como el mejor debido a que los vehículos presenta el menor tiempo promedio de recorrido, siendo el mismo de 264,51 segundos y siguiendo una distribución exponencial de la forma $135 + \text{Expo}(130)$. Además, la cantidad de vueltas máximas que un vehículo puede realizar es menor que en el escenario tres (de mayor frecuencia de creación de vehículos). Ambos son estadísticamente distintos, razón por la cual al establecer una frecuencia de entrada de un carro cada 27 segundos de simulación se obtiene una significativa reducción de las variables respuestas.

7. 2. Recomendaciones

- Los vehículos que se encuentran fuera de la rotonda, y aún no han circulado por la misma, pueden cambiarse de canal para esquivar algún obstáculo que les impida el movimiento. Adicionalmente, se recomienda que puedan ser capaces de realizar dicha acción para ubicarse en el carril de entrada donde exista mayor flujo vehicular. Es decir, deberían tender a cambiarse al carril 1 de las entradas debido a que comunica con el anillo externo de circulación por lo que es menor la complejidad de las decisiones necesarias para realizar la maniobra (solo debe observarse que no existan otros agentes en el anillo externo). Dicha acción ocasionará una reducción en el tiempo de recorrido dado que, en esta posición, los Conductores entran con mayor facilidad a la rotonda y, además, permite una mayor aproximación a la realidad. Particularmente serán beneficiados los

vehículos que deben salir en la siguiente salida dado que no tendrán que realizar cambios de canal y facilitara los movimientos de los otros Conductores

- Se recomienda introducir otras entidades tales como semáforos, peatones y motocicletas con el objeto de tener mayor diversidad de agentes en el entorno.
- Se recomienda introducir nuevas calles con el objeto de aumentar el tamaño de la red vial y poder analizar los efectos que ocurren en los entornos a la rotonda.
- Se recomienda introducir como variable respuesta del modelo la cantidad de veces que un agente debe acelerar y frenar, así como el tiempo que permanece detenido. Esto permitirá conocer más relaciones entre la tasa de vehículos que circulan por la rotonda y las interacciones que ocurren entre ellos.
- Se recomienda utilizar otro simulador que permita el modelado de agentes debido a que SeSAm presenta poca capacidad en el diseño de las curvas de la rotonda. Además, durante el desarrollo del razonamiento de los agentes, resulta complicado determinar cuáles correcciones deben realizarse debido a que el software suministra poca información sobre el motivo y la ubicación del error. Por otro lado, no es suficiente el material informativo que se encuentra sobre el funcionamiento del software.

BIBLIOGRAFÍA

Libros

Canavos, G. (1988). *Probabilidad y estadística: Aplicaciones y métodos*. México: McGraw-Hill.

Gilbert, N., y Troitzsch, K. (2005). *Simulation for the social scientist*. England: McGraw-Hill.

Kelton, D., Sadowski, R., y Sadowski, D. (1998). *Simulation with Arena*. Estados Unidos de América: McGraw-Hill.

López Casuso, R. (1984). *Introducción al cálculo de probabilidades e inferencia estadística*. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello.

Pressman, R. (2002). *Ingeniería del software: Un enfoque práctico*. Madrid: McGraw-Hill.

SeSAm. (2011). *SeSAm multiagent simulation*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2012, de SeSAm-Wiki: <http://130.243.124.21/mediawiki/index.php/Tutorials>

Siegel, S., y Castellan, N. (2007). *Estadística no paramétrica aplicada a las ciencias de la conducta*. México: Trillas.

Manuales

Del Val, M. (2002). *XVI Curso Internacional De Carreteras*. Madrid: Fundación Agustín de Betancourt.

Gerencia Municipal de Urbanismo. (2000). *Instrucción de vía pública*. Madrid: Ayuntamiento de Madrid.

Gobierno de España. (2013). *Real Decreto Legislativo 339/1990 por el que se aprueba el texto articulado de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial*. España.

Publicaciones digitales

Canosa Zamora, E., y García Carballo, Á. (2009). Enmascarando la pobreza del paisaje urbano: Rotondas y arte público. *Bolentín de la Asociación de Geógrafos Españoles* , 249-273.

Fernández Loureiro, E., y García, P. (2007). *Métodos estadísticos y valor p (P-value): historia de una controversia*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.

Klügl, F., Oechslein, C., Puppe, F., y Dornhaus, A. (2004). Multi-agent modelling in comparison to standar modelling. *Simulation news europe* , 3-9.

Macal, C., y North, M. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of simulation* , 151-162.

Pedraza, L., Hernández, C., y López, D. (2012). Control de tráfico vehicular usando ANFIS. *Ingeniare* , 79-88.

Rueda, L., y Rico, D. (2007). Modelamiento inicial de ciudades de países en vías de desarrollo, utilizando dinámica de sistemas. *Scientia Et Technica* , 421-426.

Tesis

Álvarez, C., y Soto, A. (2008). *Diseño de un sistema multiagente para un software de simulación de celdas de producción robóticas*. Santiago de Chile: Universida de Santiago de Chile.

Armas Zapata, D. (2011). *Determinación de los cambios que se producen en una ruta de distribución cuando se sustituyen los semáforos (dispositivos de reculación aplicada) por rotondas (sistemas de autoregulación) en una ciudad virtual, haciendo uso de un modelo de simulación*. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello.

Arvelaiz, M. (2012). *Desarrollo e implementación de un conjunto de herramientas computacionales para el modelado de tráfico heterogéneo en intersecciones con semáforos: Caso venezolano*". Caracas: Universidad Católica Andrés Bello.

De Urreaza Taberna, J. (2001). *Utilización de agentes inteligentes dentro de un ámbito de simulación microscópica de tráfico autónomo*. Paraguay: Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción".

Fernández Isabel, A. (2010). *Simulación del comportamiento de los conductores mediante agentes inteligentes*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Martinez, L. (2005). *Simulador multiagente de tráfico urbano*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas.

Robles Hurtado, S. (2012). *Determinación de las restricciones de tráfico a ser aplicadas en la mejora del flujo vehicular dentro de una ciudad virtual donde todos los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) han sido sustituidos por rotondas (sistemas de autoregulación)...* Caracas: Universidad Católica Andrés Bello.

Valsecchi Pellico, A., y Marín Armas, D. (2011). *Determinación de las mejores rutas de distribución dentro de una ciudad virtual donde todos los semaforos (dispositivos de regulación aplicada) han sido sustituidos por rotondas (sistemas de autoregulación), haciendo uso de un modelo de simulación*. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello.

ANEXOS

Anexo 1.- Etapas del modelo de prototipo evolutivo

1) Definir requerimientos

Inicialmente se contempló la creación de un modelo de simulación donde los carros se moverían alrededor de una redoma similar a la planteada por (Robles Hurtado, 2012). Fueron establecidos los objetivos, el alcance, las limitaciones y antecedentes. Además, esta etapa también abarco el proceso de familiarización con el programa.

2) Desarrollo del prototipo

Prototipo 1: Consistió en el desarrollo inicial del modelo donde el esfuerzo se enfocó en su movimiento constante siguiendo la ruta del anillo de circulación. Se trató de crear una redoma circular pero, en vista de la poca capacidad que presenta SeSAM para la elaboración de curvas, se decidió cambiar a una redoma cuadrada.

La geometría cuadrada permite no modificar constantemente la dirección sino solamente realizar cuatro cambios al moverse en la ruta del anillo de circulación.

Para ejecutar el movimiento de los vehículos, se estableció que los mismos deben buscar la primera baldosa de circulación que encuentren en un radio de observación de 1 metro para después modificar su dirección y posición. Esto permite girar en las esquinas siguiendo un recorrido anti-horario alrededor de la rotonda pero aun sin poderse cambiar de canal de circulación. Las baldosas de circulación tienen una dimensión de 5 unidades de largo y de ancho

Prototipo 2: Además de las consideraciones del prototipo 1, se estableció que el mapa debe ser no toroide y cuadrado, con dimensiones de 360 de ancho y de alto.

Se estableció el recorrido de los vehículos de acuerdo al diseño de la rotonda de tipo I presentado por (Robles Hurtado, 2012), donde existen tres entradas y tres salidas de la intercepción con dos canales para la circulación. Se identificaron ambos canales para poder facilitar el movimiento de los vehículos, los cuales se moverán a una velocidad constante de 3 unidades por cada segundo de iteración.

Se estableció que al realizar una observación, de otros vehículos o baldosas, los agentes deben respetar la forma del objeto. De esta manera, aunque solo se observe un segmento del objeto, podrá identificarse y decidir al respecto.

Para mejorar la circulación, se crearon los recursos “Frontera de canal” con los cuales los Conductores pueden medir la distancia desde su posición hasta dicho elemento con el objeto de poder corregir su curso centrando su posición en la baldosa de circulación.

En el razonamiento de los agentes ahora existen varias actividades que compiten para ejecutarse. Las mismas se encuentran conectadas por reglas que, al cumplirse, permiten su ejecución. En caso de que varias actividades puedan ejecutarse (distintas reglas se cumplan) será elegida cualquiera de ellas.

Prototipo 3: Se extendió el recorrido hasta los márgenes del mapa de simulación y se desarrollaron las actividades de entrada y salida de la rotonda pero aún sin considerar ceder el paso a los vehículos que se encuentran en el anillo de circulación.

Para determinar cuándo debe hacerse la salida, se dividió la redoma en 5 sectores donde el sector 0 corresponde a las esquinas y a los tramos de recorrido fuera de la intersección.

Un carro podrá salir cuando encuentre el sector de redoma donde se encuentra su salida. Sin embargo, aun no se trabaja con las maniobras de cambio de canal por lo

que solamente podrán realizar la maniobra aquellos agentes que se encuentran en el canal externo de circulación.

Además, se crearon las variables “Numero de canal de entrada” (y de salida) para las baldosas de circulación con el objeto de permitir a los Conductores identificar cuándo deben realizar las maniobras de entrada y de salida.

Prototipo 4: Se identificó la variable de sistema “Balance Point” (Punto de Balance, en español) utilizada por los recursos y agentes. Con esta variable, el centro de los carros y de las baldosas puede ubicarse en el centro de sus figuras lo que permite a los vehículos realizar giros en las curvas correctamente y una mejor percepción de los otros conductores.

Centrando los objetos se puede eliminar los recursos “Frontera de canal” y las actividades relacionadas con centrar los vehículos en las baldosas de circulación, debido a que ahora pueden seguir fácilmente el recorrido de la rotonda.

Para mejorar el movimiento, se cambió el orden con que se ejecutan las acciones de esta actividad. Ahora, los carros primero se mueven, luego actualizan su posición y, por último, buscan la siguiente baldosa de circulación.

Debido a problemas presentes en el movimiento de los vehículos, las baldosas de circulación han sido reducidas a un tamaño de 2 unidades de largo y de ancho. Además, se redujo la velocidad de circulación a 1 unidad por segundo de iteración, de esta forma se obtiene un mejor desempeño en el recorrido y no necesitan ser consideradas tasas de aceleración o de frenado.

Al considerar ceder el paso a los vehículos que se encuentran dentro del anillo de circulación, la función de entrada a la redoma se extendió tanto que ha sido necesario agrupar dicha secuencia de actividades. Cuando el agente se encuentra con la baldosa donde puede entrar a la redoma, su motor de razonamiento ejecuta esta secuencia de actividades donde primero se evalúa si es necesario ceder el paso y luego se realiza la entrada.

Se ha creado una secuencia de actividades que permite ubicar a los conductores en el canal interno de la redoma siempre que no se encuentre en una esquina, que otro conductor no impida la maniobra, que se encuentre en el mismo sector de la redoma donde está la salida que busca o que su salida se encuentre justo después de su entrada a la redoma.

Ha sido necesario crear nuevas variables para los agentes que les permitan reconocer cuándo se ejecuta la maniobra; es decir, se le han colocado luz de cruce a los agentes para informar a los otros cuando se realiza algún cambio de canal.

Aun no se contempla ejecutar estas funciones para esquivar algún agente que se encuentre detenido pero su complejidad ha ocasionado que tengan que ser dichas actividades, como se hizo con la entrada a la rotonda.

Además, estas actividades de cambio de carril han ocasionado que sea necesario aumentar la complejidad de la actividad de girar en las esquinas, por lo que ha sido necesario separarla de la actividad de movimiento para así evitar confusiones.

Se agregaron nuevas actividades: Acelerar, frenar e inicio (donde se establecen las variables iniciales cuando un carro es creado)

Prototipo 5: Utilizando como ejemplo la secuencia de actividades de cambiarse al canal interno, se ha creado la actividad de cambiarse al canal externo del anillo de circulación. Ambos casos han sido extendidos para poder ser aplicados dentro y fuera de la rotonda.

En caso de cambiar al carril interno, los vehículos podrán realizar el movimiento siempre que la salida que buscan no se encuentre justo después de la entrada donde han sido creados. En el segundo caso, se podrá realizar el movimiento cuando el agente se encuentre en el sector de redoma donde se encuentra su salida.

Sin embargo, ambas actividades han aumentado tanto su complejidad que ha sido necesario agruparlas en secuencias de actividades. En caso de que se entre en alguna de estas secuencias de actividades y no se cumplan los requisitos para

ejecutarlas, el motor de razonamiento sale de dicha secuencia y vuelve a evaluar las actividades principales (acelerar, frenar, moverse, etc).

Para evitar confusiones entre aquellos vehículos que están dentro y fuera de la intercepción, se ha creado la variable “¿está dentro de la redoma?”. Esto permite facilitar el reconocimiento entre los vehículos.

Prototipo 6: Desde el punto del balance (Balance Point) de cada vehículo se realiza la percepción de otros individuos. Por lo tanto, es necesario considerar la distancia que existe desde el centro hasta los bordes del mismo y, además, una distancia extra para así determinar la distancia total que debe emplearse para realiza una observación del entorno.

Para cambiar de canal de circulación, la función incluida en SeSAm “MoveTowardsPos” ocasiona problemas debido a que siempre utiliza el mismo ángulo de inclinación en los vehículos y permite que en una sola iteración el agente se desplace más de una vez.

Por lo tanto, ha sido necesario modificar estas actividades para que cada agente busque la baldosa más cercana a la que quiere dirigirse (en un radio de 5 unidades de observación), cambie su dirección hasta dirigirse directo a la baldosa y pueda desplazarse hasta alcanzarla con una velocidad de una unidad por cada segundo de iteración.

Se estableció la secuencia de actividades para creación de los agentes, con una probabilidad igual a $1/3$ en cada una de las tres entradas y $1/2$ en cada uno de los carriles de circulación. Para ello, primero, se trabaja con las variables “Densidad de carros”, “Carro entrando” y “Tiempo de entrada”, las cuales son utilizadas solamente por el agente “Mundo de carros”.

La primera permite establecer el nivel de densidad del escenario que pretende evaluarse, la segunda cuenta la cantidad de carros que son creados en un instante (valor que aumentará hasta ser igual al de la primera variable mencionada) y la

tercera indica el instante de la simulación en que se permite la creación de los vehículos, y permitirá definir los escenarios de desarrollo del modelo.

Además, fue introducida la actividad de desaparecer, la cual se ejecuta cuando un vehículo ha salido de la rotonda y se encuentra con una baldosa de circulación identificada como final de camino. De esta forma, los agentes pueden salir de la simulación y no aglomerarse luego de realizar todo el recorrido.

Prototipo 7: Cuando un Conductor necesita frenar, observa si tiene otro vehículo detrás y, en caso de existir alguno, le informa que también debe detenerse. Posteriormente, al acelerar le informará a dicho vehículo que ya no necesita permanecer detenido. Esto permite que los Conductores puedan adaptarse a distintas situaciones que se presenten.

Se introduce la actividad de abortar algún cambio de canal en caso de que el agente tenga 6 segundos de simulación tratando de realizar la maniobra sin éxito. De otra forma, el mismo se queda detenido hasta poder realizar la maniobra o continúa su movimiento recto sin girar en las esquinas.

Se observó que al querer realizar estas maniobras, el conductor puede escoger la baldosa que se encuentra justo al lado, ocasionando ángulos de 90° al cambiar de canal. Por lo tanto, ha sido necesario restringir el área de observación de baldosas para que esto no ocurra y, además, implementar reglas redundantes que impidan la ocurrencia de esta situación.

Ha sido necesario ajustar las reglas de cambio de canal debido a que su complejidad ha aumentado mucho y, en ocasiones, se entra en un ciclo infinito. Por lo tanto, algunas reglas generales han sido desplazadas fuera del grupo de actividades de cambio de canal; permitiendo así una mejor capacidad del motor de razonamiento de evaluar la situación antes de entrar en estas actividades.

Por efectos de simulación, se ha introducido también la capacidad de tener vehículos de distintos colores. Esto permite una mejor evaluación de los elementos.

Prototipo 8: Debido a la complejidad que ha alcanzado el modelo, ha sido necesario dividirlo en dos etapas: Acciones fuera y dentro de la redoma.

Fuera de la redoma, existen las actividades: Movimiento, frenar, acelerar, entrar a la rotonda, cambiarse de canal, desaparecer.

Al momento de entrar en la redoma, el Conductor debe ceder el paso por lo que evalúa dos veces que no exista algún otro vehículo que interfiera su movimiento de entrada. Sin importar el canal de circulación, se revisa que no exista un vehículo próximo a la derecha o a la izquierda (evitando así colisionarlo en la parte trasera o delantera, respectivamente).

En caso de que igualmente no sea percibido algún vehículo próximo dentro de la rotonda, el Conductor es capaz de detenerse y ceder el paso del mismo; siendo así capaz de adaptarse.

De igual forma, las secuencias de cambio de canal pueden ser abortadas debido a que el vehículo se encuentra en alguna intersección, tiene más de siete segundos tratando de realizar la actividad o algún otro agente impide la maniobra.

Dentro de la redoma, existen las actividades: Movimiento, frenar, acelerar, giros en las esquinas, cambiarse de canal, impedir movimiento de entrada y salir de la rotonda.

Las actividades son muy parecidas pero la de mayor diferencia es la que impide la entrada a la rotonda de otros vehículos fuera de esta. Esta actividad permite garantizar la prioridad de circulación al influir sobre aquellos agentes que se encuentran cediendo el paso, obligándolos a frenar en caso de que estos no hayan realizado una buena percepción y exista riesgo de colisión.

Prototipo 9: Es introducido un nuevo sector de redoma teniendo un total de seis. Esto permite identificar con el número 0 a las baldosas fuera de la rotonda y con el número 5 a las baldosas en las esquinas de la misma. Así se facilita el reconocimiento de las esquinas y evita confusiones con otras áreas de la intercepción.

Además, se introduce la variable de baldosas de circulación “¿impedir cambio de canal?” la cual que permite crear restricciones de cambio de canal en áreas críticas tales como las esquinas de la rotonda y las intercepciones con las entradas a la misma. De esta forma, se disminuyen la cantidad de errores ocurridos en dichas áreas debido a la maniobra de cambiarse de canal.

Sumado con la variable “¿pasó la salida?” se puede diferenciar entre aquellos vehículos que están fuera de la rotonda y están comenzando el recorrido de aquellos que se encuentran terminándolo. Esto impide errores en actividades como cambio de canal, donde se observó el caso de confundir vehículos creyendo que eran obstáculos cuando realmente estaban saliendo de la rotonda.

Se ha reducido el tamaño del mapa a 148 unidades de longitud para así disminuir el tiempo de circulación fuera de la rotonda.

Prototipo 10: Ha sido necesario introducir la variable de los agentes “carril auxiliar” la cual actúa al momento de cambiarse de canal y permite establecer cuál es la baldosa a la que se quiere llegar. Al reconocerla, se evalúa que no se encuentre en una esquina o en alguna zona de prohibición de cambio de canal.

Además, en el mismo conjunto de acciones, los Conductores continúan percibiendo a vehículos que se encuentran adelante en el carril al que quieren ingresar; es decir, que realmente no les ocasiona problemas en la maniobra. Por lo tanto, ha sido necesario extender las restricciones para que solamente se consideren aquellos vehículos que realmente afectan la maniobra.

3) Entrega del modelo

Se procedió a probar y verificar el funcionamiento del modelo final para después comenzar con el desarrollo de los escenarios de implementación a partir de los cuales fueron obtenidos los tiempos de recorridos de los distintos vehículos.

Anexo 2.- Esquema del motor de razonamiento

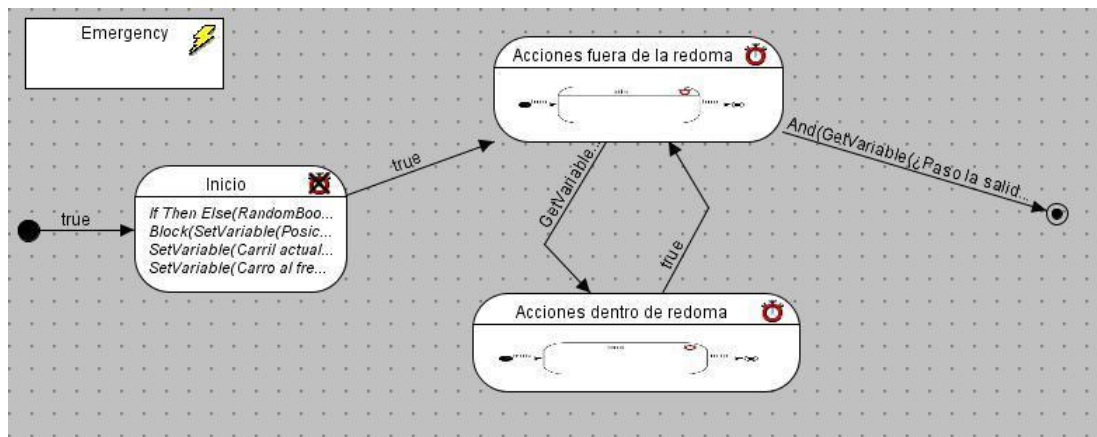


FIGURA 25.- ESQUEMA INICIAL DEL MOTOR DE RAZONAMIENTO.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Anexo 3.- Actividades del motor de razonamiento fuera de la rotonda

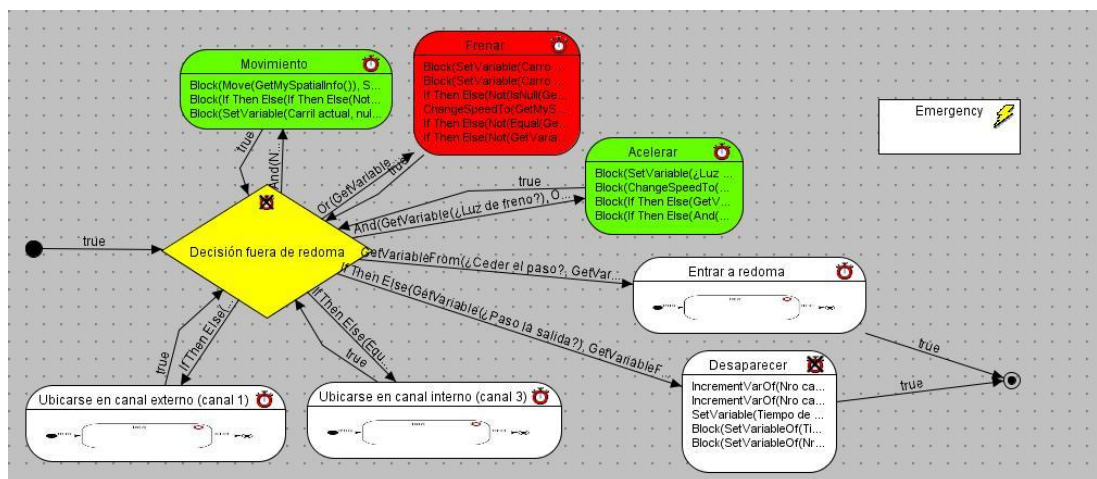


FIGURA 26.- ACTIVIDADES FUERA DE LA ROTONDA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Anexo 4.- Actividades de entrada a la rotonda

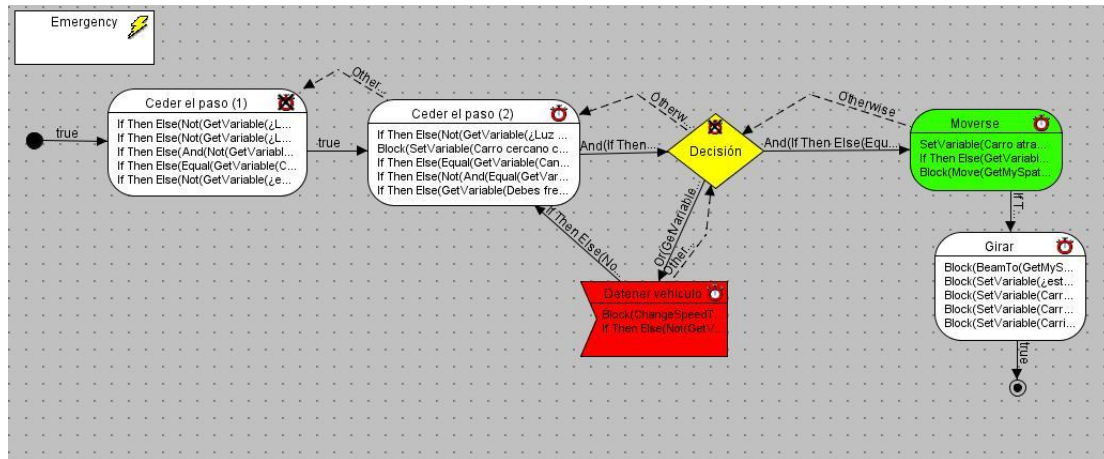


FIGURA 27.- ACTIVIDADES DE ENTRADA A LA ROTONDA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Anexo 5.- Ubicarse en el carril interno fuera de la rotonda

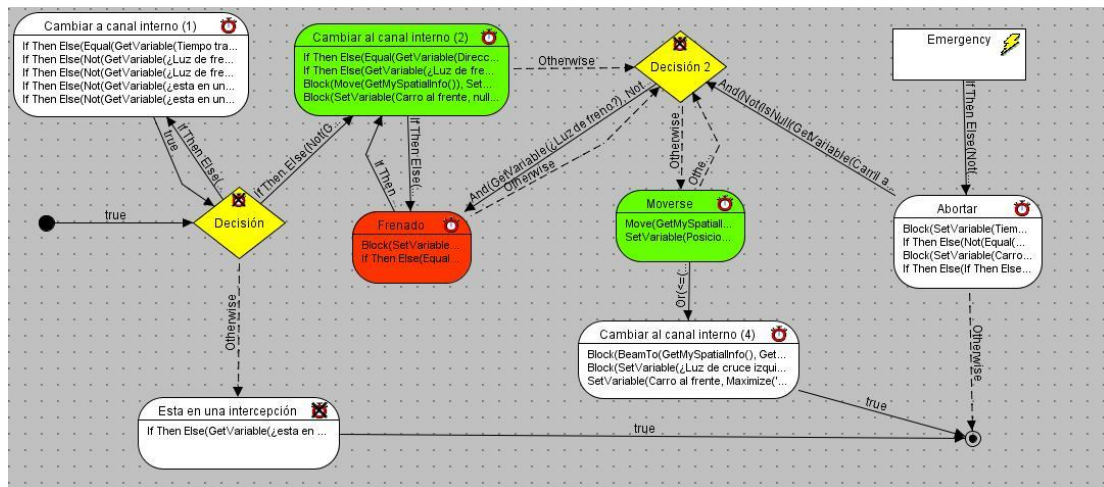


FIGURA 28.- UBICARSE EN EL CARRIL INTERNO FUERA DE LA ROTONDA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Anexo 6.- Ubicarse en el carril externo fuera de la rotonda

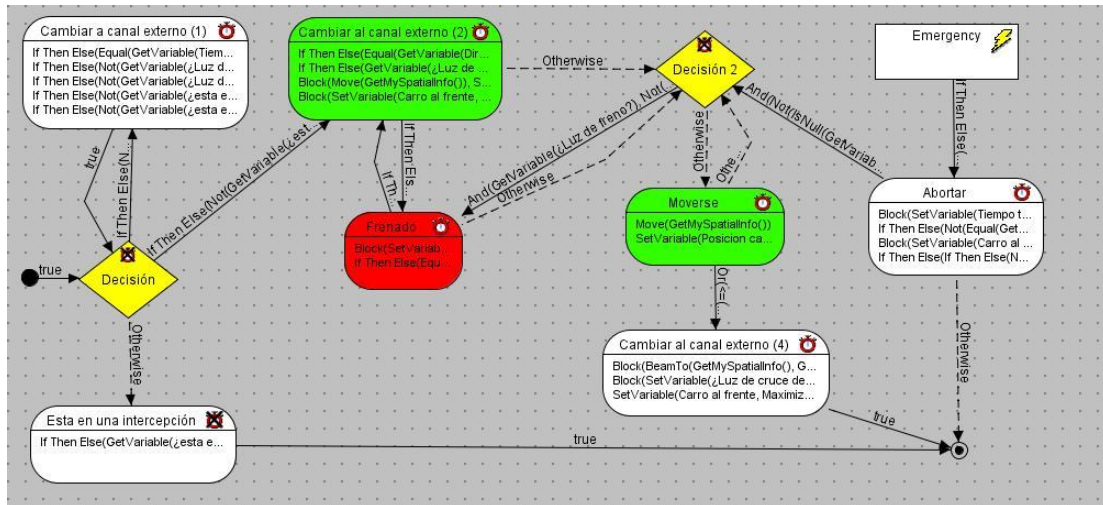


FIGURA 29.- UBICARSE EN EL CARRIL EXTERNO FUERA DE LA ROTONDA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Anexo 7.- Actividades del motor de razonamiento fuera de la rotonda

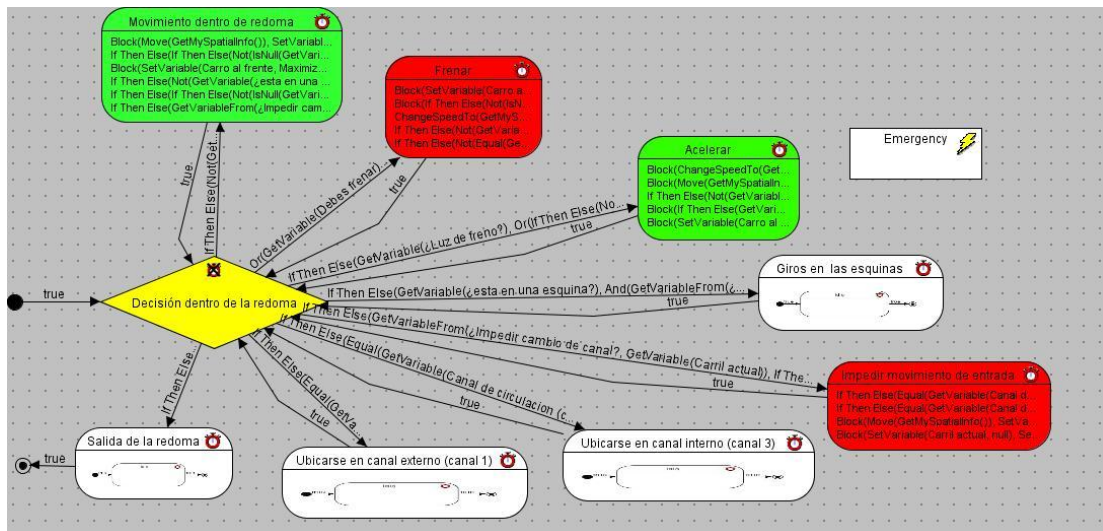


FIGURA 30.- ACTIVIDADES DENTRO DE LA ROTONDA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Anexo 8.- Actividades de giros en esquina

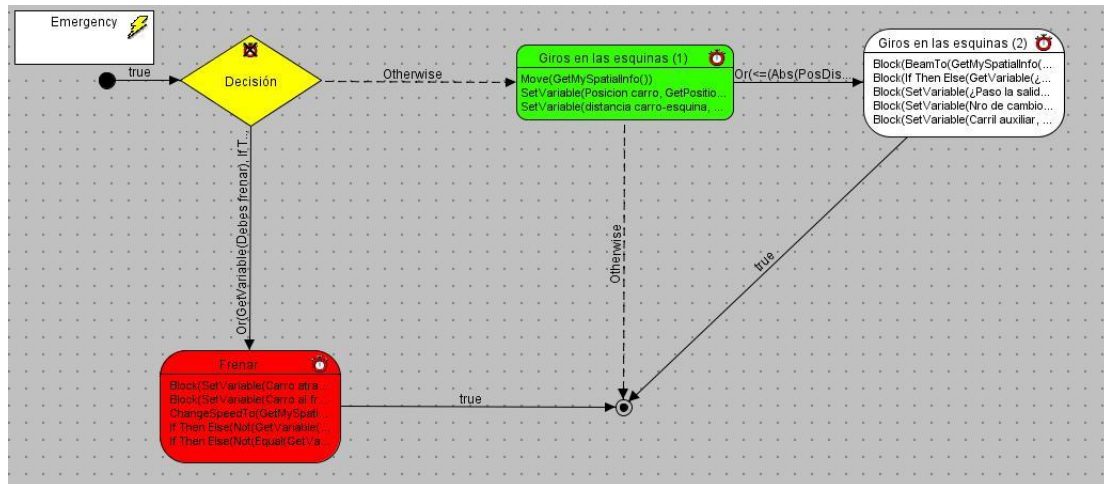


FIGURA 31.- ACTIVIDADES DE GIROS EN ESQUINA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Anexo 9.- Ubicarse en el carril interno dentro de la rotonda

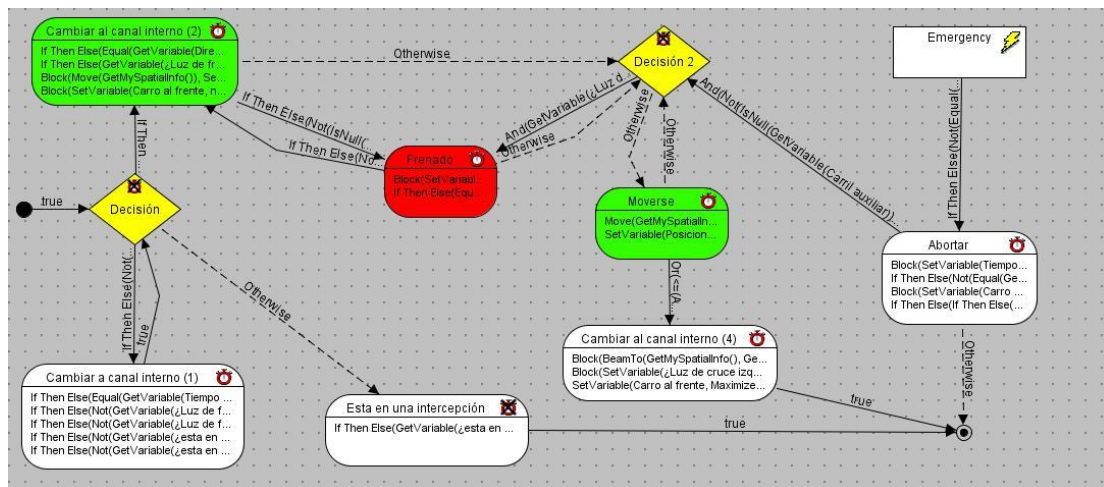


FIGURA 32.- UBICARSE EN EL CARRIL INTERNO DENTRO DE LA ROTONDA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Anexo 10.- Ubicarse en el carril externo dentro de la rotonda

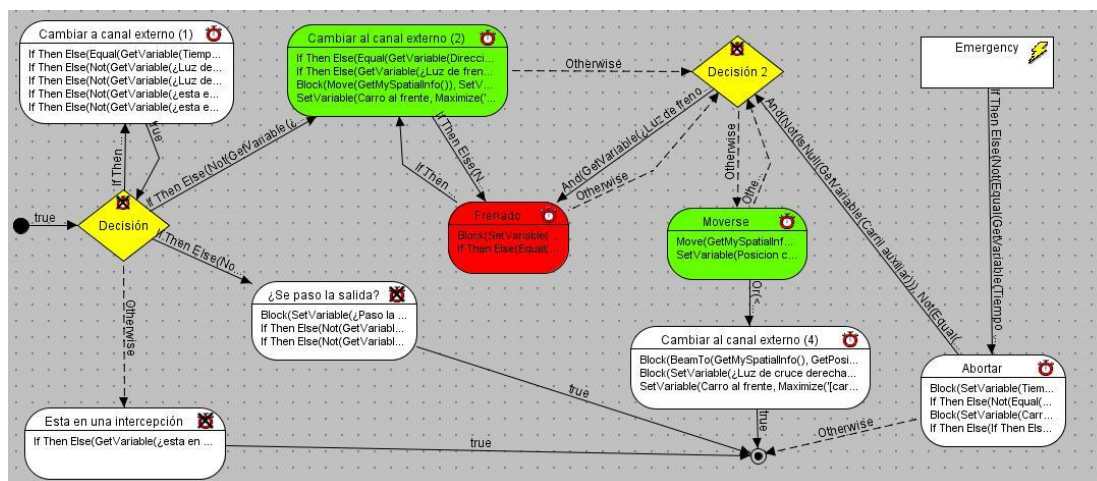


FIGURA 33.- UBICARSE EN EL CARRIL EXTERNO DENTRO DE LA ROTONDA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Anexo 11.- Actividades de salida de la rotonda

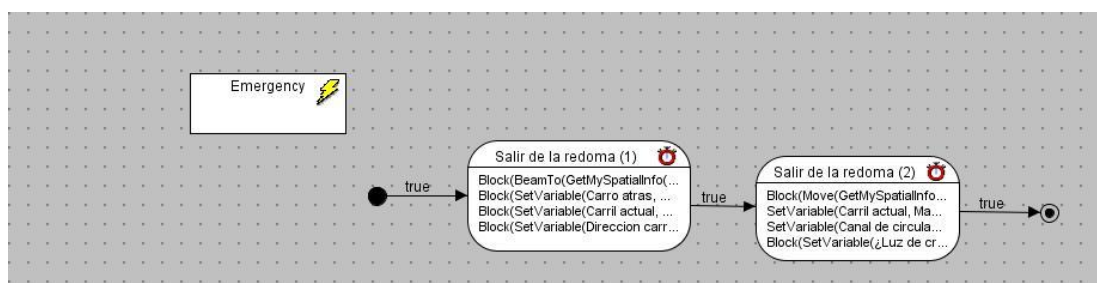


FIGURA 34.- ACTIVIDADES DE SALIDA DE LA ROTONDA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Anexo 12.- Datos de vehículos

TABLA 12.- DATOS DE VEHÍCULOS

Modelo	Longitud (mm.)	Ancho (mm.)
Fiat-Uno	3693	1357
Fiat-Uno	3693	1357
Fiat- Palio 1.4 FIRE	3827	1418
Fiat- Palio 1.4 FIRE	3827	1418
Fiat- Nuevo Palio 1.4	3487	1640
Fiat- Nuevo Palio 1.4	3487	1640
Fiat- Nuevo Palio ELX 1.8	3487	1640
Fiat- Nuevo Palio ELX 1.8	3487	1640
Fiat- Nuevo Palio 1.8R	3487	1640
Fiat- Nuevo Palio 1.8R	3487	1640
Fiat-Palio Adventure	4257	1422
Fiat- Palio Weekend	4215	1418
Fiat-Siena Fire	4135	1418
Fiat- Idea	3931	1451
Fiat- Idea adventure	4142	1469
Fiat-Punto HLX 1.8	4030	1471
Fiat- Strada Adventure	4444	1425
Fiat- Fiorino Furgón 1.3 L	4183,7	1332
Fiat- Nuevo Siena	4155	1415
Renault- Sandero	4021	1746
Renault- Simbol II Taxi	4261	1940
Renault- Kangoo Sportway	3995	1633
Renault- Kangoo Express	3995	1633
Toyota- Corolla Xei A/T	4540	1760
Toyota- Corolla Xei M/T	4540	1760

Toyota- Corolla Gli A/T	4540	1760
Toyota- Corolla Gli M/T	4540	1760
Toyota- Fortuner 4x2	4705	1840
Toyota- Fortuner 4x4	4705	1840
Toyota- Hilux 4x4 A/T V6	5260	1835
Toyota- Hilux 4x4 M/T V4	5260	1760
Toyota- Hilux 4x2 A/T V4	5260	1760
Toyota- Terios A/T	4055	1695
Toyota- Terios M/T	4055	1695
Chevrolet- Aveo 1.6 3p T/A	3920	1680
Chevrolet- Aveo 1.6 5p T/A	4310	1710
Chevrolet- Cruze	4597	1788
Chevrolet- Optra Advance	4500	1725
Chevrolet- Spark Hatchback	3495	1495
Peugeot-207 Compact 1.4 Manual	3872	1669
Peugeot-207 Compact 1.6 Manual	3872	1669
Peugeot-207 Compact 1.6 Triptronica	3872	1669
Peugeot - Partner	4137	1960
Peugeot- 307 Sedan TAXI	4200	1730
Peugeot-408	4690	1815
Dodge- Caliber LX	4415	1993
Dodge- Caliber LE	4415	1993
Dodge- Caliber L	4415	1993
Citroën- C2	3666	1659
Citroën- C3	3860	1912
Citroën- C4 coupé VTR 1.6	4273	1769
Citroën- C4 Sedán 1.6 SX	4771	1773
Citroën- C4 Sedán 2.0 SX	4771	1773

Citroën- C4 Sedán 2.0 Exclusive	4771	1773
Citroën- Grand C4 Picasso	4590	2100
Citroën- XsaraPicasso	4280	2000
Citroën- Berlingo	4137	1960
Citroën- Jumpy Comby 8 puestos	4813	2194
Citroën- Jumpy furgon	5143	2194
Honda- Accord EX-L Sedán TM	4854	1820
Honda- Accord EX-L Sedán TA	4854	1820
Honda- Civic Emotion LXS MT	4489	1752
Honda- Civic Emotion LXS AT	4489	1752
Honda- Civic Emotion EX-L MT	4489	1752
Honda- Civic Emotion EX-L AT	4489	1752
Honda- Fit LX MT	3830	1675
Honda- Fit LX CVT	3830	1675
Honda- Fit LXL MT	3830	1675
Honda- Fit LXL CVT	3830	1675
Honda - Civic Coupé EX-L MT	4440	1751
Honda - Civic Coupé EX-L AT	4440	1751
Honda- Pilot EX-L	4774	1969
Honda- Legend	4957	1847
Honda- Odyssey EX	5015	1960
Honda - CR-V LX TA	4520	1820
Honda - CR-V LX TM 4x4	4520	1820
Honda - CR-V LX TA 4x4	4520	1820
Honda - CR-V EX TM	4520	1820
Honda - CR-V EX TA	4520	1820
Nissan- Sentra T/M	4324	1640
Nissan- Sentra T/A	4324	1640
Nissan - Almera PE A/T	4510	1710

Nissan- Almera PE M/T	4510	1710
Nissan- Almera SE A/T	4510	1710
Nissan - TIIDA Sedán T/M	4395	1695
Nissan- TIIDA Sedán T/A	4395	1695
Nissan- Sentra 2.0S /6MT	4567	1790
Nissan- Sentra 2.0S / CVT	4567	1790
Nissan- Sentra 2.0 SL/CVT	4567	1790
Nissan- Altima 2.5 S	4821	1796
Nissan- 370Z	4310	1815
Nissan- Frontier KA24DE D/C	5080	1825
Nissan- X-Trail 4X4	4455	1765
Nissan- X-Trail 4X2	4455	1765
Nissan-Patrol GRX	5080	1940
Nissan- Patrol GL	5080	1940
Nissan- Murano SE	4770	1880
Ford- Fiesta T/M	3913	1903
Ford- Fiesta T/A	3913	1903
Ford- Explorer 4x4	5006	2291
Promedio	4337	1743

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA